

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara-Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie mécanique : Transport et distribution des hydrocarbures

Présenté par :

BOUSKINE FELLA

THEME

**Stockage des produits pétroliers et étude de phénomène du
« Boil-Over »**

Kessal Mohand
Younsi Karim
Bouhafis Smail

Professeur
MCB
MAB

UMBB
UMBB
UMBB

Encadreur
Examineur
Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier le bon dieu de m'avoir aidé à arriver au terme de ce travail dans les meilleures conditions.

Je tiens à adresser mes gratitude à Mon encadreur monsieur Pr M.Kessal, de m'avoir encadrée, Suivie et orientée tout le long de mon travail.

Je profite aussi de l'occasion pour remercier tous les enseignants que m'avons pu avoir dans ma scolarité, comme je tiens également à remercier le personnel de l'université, et de la SONATRACH HEH, mes amis, mes camarades de la promotion, ainsi que tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près.

Dédicaces :

Je dédie ce travail à:

A ma mère à qui je dois tout dans

La vie et que je ne remercierai jamais assez pour son soutien,

Encouragement durant tout mon parcours scolaire.

Ma chère sœur Madiha

Mes chères amie Fethia, Hafsa , Meriem , Yamina , Hadia, Bouchra

qui m'ont inspirées et soutenues

Ainsi que toute la famille

Tous mes amis et toutes les personnes qui ont participé de près ou de

loin dans ce travail.

Tables des matières :

Remerciement.....	i.
Dédicace.....	ii.
Liste des figures.....	iii.
Liste des tableaux.....	iv.
Introduction générale.....	1.

Chapitre 1 : Généralité sur le stockage des hydrocarbures

I -1-Introduction.....	2.
I -2-Definition.....	2.
I -2-1-Le pétrole.....	2.
I -2-2-Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)	3.
I -2-3-Le condensat.....	3.
I -2-4-Parc de stockage.....	3.
I-3-1-Réservoir cylindrique verticaux.....	3.
I-3-Types du réservoir de stockage des hydrocarbures.....	3.
I-3-2-Principaux éléments constitutifs.....	4.
I-3-2-3-Le toit.....	4.
I-3-2-2-La robe.....	4.
I-3-2-1-Le fond de bac.....	4.
I-3-2-1-a-Réservoir à toit fixe.....	4.
I-3-2-1-b-Réservoir à toit flottant.....	5.
I-3-2-4-accessoires.....	6.
I-3-2-4-a-Bague de renforcement.....	6.
I-3-2-4-b-Plate-forme supérieure.....	7.
I-3-2-4-c- Event.....	7.
I-3-2-4-d-Clapet d'aération automatique.....	7.
I-3-2-4-e-Systèmes de joint.....	7.
I-3-2-4-f-Système d'évacuation des eaux de pluie.....	8.
I-3-2-4-j-les béquilles.....	8.
I-3-2-4-k-Déversoir d'injection de la mousse.....	9.
I-3-2-Réservoirs sphériques.....	9.
I-3-3-Réservoir cylindrique horizontale.....	10.
I-3-4-Réservoir cryogénique.....	11.
I-4-Modes de stockage.....	11.
I-4-1-Trois modes de stockage peuvent être envisagés.....	12.

I -4-1-1-Stockages sous pleine pression.....	12.
I -4-1-2-Stockages réfrigérés et cryogéniques.....	12.
I -4-1-2-Stockage semi-réfrigérés.....	13.
I-5-Conclusion.....	13.

Chapitre 2 :

Les risques et phénomènes liés au stockage des hydrocarbures

II-1- Définition du risque.....	14.
II-2- analyse des risques.....	15.
II-3- Les accidents majeurs.....	18.
II-3-1-dommage.....	19.
II-4-effet domino.....	21.
II-4-1-Classification des effets domino.....	21.
II-5-Les sources des accidents.....	22.
II-6-Accidents et phénomène lié au stockage.....	23.
II-6-1-Les incendies.....	23.
II-6-1-1-La combustion.....	23.
II-6-1-2-Le triangle de feu.....	24.
II-6-1-3-Réaction de combustion et chaleur de combustion.....	15.
II-6-1-4-les types des incendies.....	25.
II-6-1-4-a) feu de nappe.....	26.
II-6-1-4-b) Jet fire.....	28.
II-6-1-4-c) Flash fire.....	28.
II-6-2- Les explosions.....	29.
II-6-2-1- Comment une explosion peut se produire.....	29.
II-6-3-2- Les effets de l'explosion.....	30.
II-6-2-3-Comment prévenir les explosions ou en limiter les effets.....	31.
II-6-3- Froth-over.....	32.
II-6-4-Slop-over.....	32.
II-6-4-Slop-over.....	32.
II-6-5- Back-draft (explosion de fumé).....	32.
II-6-6- flash -over.....	33.
II-6-7- UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion).....	33.
II-6-7- 1-Description des effets.....	34.
II-6-7- 1-a) Effets thermique.....	34.
II-6-7- 1-b) Effets de surpression.....	34.
II-6-8- BLEVE (boiling liquid expanding vapour explosion).....	35.

II-6-8-1- Définition.....	35.
II-6-8-2- Description du phénomène.....	35.
II-6-8-3- Température limite de surchauffe (TLS).....	36.
II-6-8-4- Comparaison entre BLEVE chaud et froid.....	38.
II-6-8-4-1- Développement de BLEVE chaud.....	38.
II-6-8-4-2- BLEVE froid.....	40.
II-7-Effets des accidents.....	41.
II-7-1- Effets thermiques.....	41.
II-7-2- Effets de pression.....	41.

Chapitre 3 :

Phénomène du boilover

III-1-Introduction.....	44.
III-2-Definition générale du phénomène.....	44.
III-3-Mécanisme du boilover.....	45.
III-4-CONDITIONS NECESSAIRES POUR ENGENDRER UN BOILOVER.....	46.
III -4-1 La présence le d'eau.....	47.
III -4-2 Onde de chaleur.....	47.
III -4-3 Hydrocarbure suffisamment visqueux.....	51.
III -5-Facteur de propension au boilover.....	51.
III-6-Les types du phénomène boilover.....	54.
III-6-1-boilover classique.....	54.
III-6-1-1-Les différentes phases d'un boilover classique.....	55.
III-6-1-2- Les conditions d'occurrence du phénomène de boilover classique.....	57.
III-6-1-3- Phénomènes à quantifier dans un boilover classique.....	58.
III-6-1-4-Conséquences de l'effet piston.....	60.
III-6-2-Boilover en couche mince.....	60.
III-6-2-1-Introduction.....	60.
III-6-2-2-definition.....	60.
III-6-2-3-Les différentes étapes conduisant à un boil-over en couche mince.....	61.
III-6-2-4-Conditions d'occurrence du boilover « en couche mince ».....	63.
III-6-2-5-Description du modèle de boilover en couche mince.....	63.
III-6-2-5-Conclusion.....	64.
III-6-Conclusion générale.....	65.

Chapitre 4 :

Prévention contre les accidents liés au stockage :

IV-1 - Les stratégies de lutte contre l'incendie.....	66.
IV-1 -1-Stratégie passive.....	66.
IV-1 -2-Stratégie défensive.....	66.
IV-1-3-Stratégie offensive.....	66.
IV-1-3-Stratégie offensive.....	66.
IV-2-Les préventions.....	66.
IV-2-1-Mesures prévention contre le risque explosion incendie.....	67.
IV-2-2-Mesures de prévention générale contre l'incendie.....	67.
IV-2-3-Installation des liaisons équipotentiels.....	67.
IV-2-4- Mesures de prévention contre la corrosion.....	68.
IV-2-5-Débordement ou avarie d'une capacité.....	68.
IV-2-6-Mesures de prévention contre la pollution des sols et plan d'eau.....	69.
IV-3-Systèmes de Protection des réservoirs.....	69.
IV-4-Historique des accidents de boilover.....	73.
IV-5-Conclusion.....	77.

Chapitre 5 :

Modélisation du phénomène boilover classique :

V -1-modelisaion du phénomène et ses conséquences.....	78.
V-1-1-Introduction.....	78.
V-1-2-Prédiction du temps de boilover.....	78.
V-1-2-1-Introduction.....	78.
V-1-2-1-1-Corrélation de yang et al (2013).....	78.
V-1-2-2-Correalation de yang et al (2013).....	79.
V -1-2-1-3-la Corrélacion de casal (2017).....	79.
V-1-2-1-4- corrélation de Kong et al. (2017).....	80.
V-1-2-1-5-Correlation de LASTFIRE (2004,2006, 2007).....	80.
V-1-2-1-6-Correlation de Buang (2014).....	80.
V-1-2-1-7- Corrélacion de Buang (2014).....	81.
V-1-2-2Conclusion.....	82.
V-1-3-EFFET BOULE DE FEU.....	82.
V-1-3-1-correlation de Casal (2017).....	82.

V-1-3-1-1- la durée de la boule de feu.....	82.
V-3-1-2-Diamètre de la boule de feu.....	83.
V-1-3-1-3- la hauteur de la boule de feu.....	83.
V-3-1-4- fraction de rayonnement.....	83.
V-1-3-1-5- la puissance de rayonnement.....	83.
V-1-3-1-6- facteur de vue.....	84.
V-1-3-2-correlation de CCPS (2000).....	84.
V-1-3-2-1- la durée de la boule de feu.....	84.
V-1-3-2-2-Diamètre de la boule de feu.....	84.
V-1-3-2-3Le centre de la boule de feu à partir du sol (m).....	85.
V-1-3-2-4- Flux émis en surface ou puissance émissive en surface.....	85.
V-1-3-2-5-La distance entre la cible et le centre de la boule de feu.....	85.
V-1-3-2-6-facteur de vu.....	85.
V-1-3-2-7- La pression partielle de l'eau.....	86.
V-1-3-2-8-Distance entre la cible et le niveau de la boule de feu.....	86.
V-1-3-2-9-coefficient de transmission.....	86.
V-1-3-2-10- Le flux de puissance reçu.....	86.
V-1-3-3- corrélation de Buang (2014).....	86.
V-1-3-3-1- la durée de la boule de feu.....	86.
V-1-3-3-2- le diamètre de la boule de feu.....	87.
V-2-Partie calcul.....	88.
V-2-1-La prédiction du temps de déclenchement de boilover.....	88.
V-2-2-L'influence de la température de stockage et la masse volumique du liquide sur le t_{bo}	92.
V-2-3-L'estimation des conséquences de boilover.....	95.
V-2-3-1-La durée de la boule de feu	95.
V-2-3-2-Le diamètre de la boule de feu.....	95.
V-2-3-3-Le centre de la boule de feu à partir du sol.....	96.
V-2-3-4-Les effets thermiques de la boule de feu.....	98.
V-2-3-4-1-Flux émis en surface ou puissance émissive en surface	98.
V-2-3-4-2- Facteur de vue.....	98.
V-2-3-4-3-Distance entre la cible et le niveau de la boule de feu (m).....	99.
V-2-3-4-4- La pression partielle de l'eau.....	99.
V-2-3-4-5- Coefficient de transmission.....	99.
V-2-3-4-6- Le flux de puissance reçue.....	99.
V-2-3-5-Les pression et la température au moment du boilover.....	102.
V-2-3-6-Zone affectée par la propagation de combustibles brûlants.....	104.
V-2-3-6-1-La quantité de combustible éjectée pendant le boilover.....	107.
V-2-3-6-2-La zone affecté par l'éjection.....	107.

V-2-3-6-3-Le diamètre de la zone affecté.....	107.
Conclusion générale.....	110.

BIBLIOGRAPGHIE

Liste des figures :

I- Figure 1 : toit flotteur a simple pont	6.
I- Figure 2 : toit flotteur a double pont.....	6.
I- Figure 3 : bague de renforcement.....	6.
I- Figure 4 : joint mécanique.....	7.
I- Figure 5 : Système d'évacuation des eaux pluviales.....	8.
I- Figure 6 : les béquilles.....	8.
I- Figure 7 : déversoir d'injection de mousse.....	9.
I- Figure 8 : bac de stockage sphérique.....	10.
I- Figure 9 : réservoir cylindrique horizontale.....	10.
I- Figure 10 : bac de stockage cryogénique.....	11.
II- Figure 1 : les étapes de l'analyse des risques.....	18.
II- Figure 2 : Dommages potentiels dérivés d'accidents majeurs.....	20.
II- Figure 3 : Exemple sur les effets domino.....	22.
II- Figure 4 : triangle de feu.....	24.
II- Figure 5 : Les types d'incendie qui peuvent se produire dans une installation industrielle.....	26.
II- Figure 6 : Température limite de surchauffe en fonction de la pression....	37.
II- Figure 7 : Arbre d'évènements pour une fuite isolable agressant des capacités de stockage mobiles.....	43.
III- Figure 1 : boilover dans un réservoir des hydrocarbures.....	45.
III- Figure 2 : principe de combustion d'un liquide inflammable.....	46.
III- Figure 3 : évolution de la température en fonction de la hauteur de réservoir pour une huile (Broeckman , 1992).....	48.
III- Figure 4 : Evolution de la température d'ébullition d'un produit composé de plusieurs éléments purs en fonction de la fraction volumique de produit distillé.....	50.
III- Figure 5 : Principe de formation de l'onde de chaleur (boilover classique).....	50.
III- Figure 6 : l'arbre des causes du phénomène boilover.....	53.
III- Figure 7 : différentes phases d'un boilover classique.....	57.
III- Figure 8 : séquence accidentelle théorique.....	57.
III- Figure 9 : Évolution de la température à l'intérieur du bac au cours de la combustion de brut.....	58.
III- Figure 10 : représentation schématique des différentes phases d'un boilover en couche mince.....	63.

IV- Figure 1 : flamme rouge et fumée noire.....	70.
IV- Figure 2 : flamme bleu / verte et fumée noire.....	70.
IV- Figure 3 : Les Feux d'évent.....	71.
IV- Figure 4 : Les Feux de joint.....	71.
IV- Figure 5 : Feux de surface obstruée par un toit coulé.....	72.
IV- Figure 6 : Feux de pleine surface.....	72.
IV- Figure 7 : Les feux de cuvette.....	73.

V- Figure 1 : courbe du temps de déclenchement du boilover en fonction de la hauteur de liquide pour plusieurs températures de stockages.....	94.
V- Figure 2 : courbe de variation de la durée de vie d'une boule de feu en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.....	96.
V- Figure 3 : courbe de la variation de la durée de vie de la boule de feu en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.....	97.
V- Figure 4 : courbe variation de la masse vaporisée en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.....	97.
V- Figure 5 : placement schématique des notations relatives à la boule de feu.....	98.
V- Figure 6 : courbe de la variation des radiations reçues en fonction de la distance du récepteur.....	102.
V- Figure 7 : Base simple pour déterminer la hauteur du mélange liquide-vapeur.....	105.
V- Figure 8 : courbe d'évolution du volume projeté pendant le boilover.....	108.
V- Figure 9 : courbe représentative de la zone affectée par le liquide projeté en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.....	109.

Liste des tableaux :

III - Tableau 1 : propension au boilover en cas de feu du bac.....	52.
III Tableau 2 : propriétés de produits susceptibles de donner lieu à un boilover.....	59.
V- Tableau 1 : constante pour résoudre l'équation de la température.....	91.
V- Tableau 2 : calcul itératif du t_{bo}	91.
V- Tableau 3 : la variation de la masse volumique du liquide en fonction de la température de stockage.....	92.
V- Tableaux 4 : calcul du t_{bo} en fonctions de la hauteur du liquide dans le reservoir pour plusieurs valeurs de temperature du stockage.....	93.
V- Tableau 5 : la durée de la boule de feu et sa géométrie en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.....	96.
V- Tableau 6 : le flux de radiation reçue par la cible en fonction de la distance.....	101.
V- Tableaux 7 : la zone affectée par le combustible projeté et la zone affecté en fonction de la hauteur de l'eau et du combustible dans le réservoir.....	108.

Introduction générale :

Le stockage des produits pétroliers est une activité présente au niveau des parties importantes de la chaîne pétrolière, à savoir les champs pétroliers, les raffineries et les ports d'expédition vers les industries étrangères.

L'exploitation des hydrocarbures a connu une extension considérable au cours de la dernière décennie en fonction du développement technologique et industriel. Ce dernier exprime son ampleur à travers la construction des réservoirs de différentes capacités et plusieurs types de stockage. Ce qui permet d'assurer la pérennité de la production malgré les interruptions accidentelles.

Les réservoirs de stockage atmosphérique constituent un aspect essentiel des raffineries et des installations de production. Ces installations se considèrent susceptibles de générer de nombreuses situations de risque catastrophique, parmi tous les phénomènes redoutés l'occurrence d'un **boilover** sur les bacs de stockages du produit liquide est la situation la plus dangereuse qui peut causer des dommages économiques et humaine.

L'objectif de ce travail consiste à réaliser une étude numérique sur le boilover classique afin de déterminer la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu, les caractéristiques de cette boule de feu et en dernier les effets du rayonnement de la boule de feu pour les produits fuel oil.

I -1-Introduction :

Les réservoirs de stockage ont été largement utilisés dans de nombreux établissements Industriels, notamment dans les usines de traitement, telles que les raffineries de pétrole et L'industrie pétrochimique.

Il existe une grande variété de réservoirs de stockage, ils peuvent être construits sur le sol, dans le sol et sous terre. De forme, ils peuvent être cylindriques verticaux, horizontaux cylindriques ou sphériques.

Les formes cylindriques verticales sont les plus utilisées. Dans un réservoir de stockage cylindrique vertical, il est en outre divisé en divers types, notamment le réservoir à toit ouvert, le réservoir à toit fixe, le toit flottant externe et le réservoir à toit flottant interne. Le type de réservoir de stockage utilisé pour le produit spécifié est principalement déterminé par les exigences de sécurité et d'environnement.

Dans les champs d'exploitations du pétrole et de gaz, le stockage des hydrocarbures consiste à Immobiliser temporairement certains volumes de fluides (pétrole ou de gaz) dans des capacités de stockage appelées appareils à pression ou réservoirs ou bacs, selon que le produit stocké est ou n'est pas sous pression.

Il a pour but de :

- La mise du produit au repos suivi d'une opération de décantation avant l'expédition (élimination de l'eau et résidus)
- Le contrôle de la qualité de produit à expédier.
- Le traitement préalable du brut afin de minimiser les problèmes d'incendie ou de corrosions des bacs et des canalisations car ces installations sont très coûteuses.
- La continuité de la production et de l'exploitation tout en assurant un stockage permanent.

I -2-Definition :

I -2-1-Le pétrole :

Le pétrole, dit aussi naphte dans l'antiquité, est une huile minérale d'origine naturelle composée d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures, piégée dans des formations géologiques particulières.

I -2-2-Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) :

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) est un mélange d'hydrocarbures, principalement des isomères de propane (C_3H_8) et de butane (C_4H_{10}). La composition de GPL dépend de son utilisation finale et varie considérablement en fonction de la saison, le pays, les propriétés de l'approvisionnement en pétrole brut/gaz utilisé et processus de raffinage.

I -2-3-Le condensat :

Le condensat est un mélange d'hydrocarbures de type C5 à C8 (c'est-à-dire à 5 à 8 atomes de carbone par molécule). C'est un produit volatil léger, instable et inflammable. Sa pression de vapeur saturante est intermédiaire entre celle d'un condensat de gaz naturel et du gaz de pétrole liquéfié. Les « condensats » sont la fraction légère mais liquide à température et pression ambiante de certains gisements ; pour ce qui est du poids de molécules, ils contiennent des hydrocarbures allant du pentane (C_5H_{12}) jusqu'à l'heptane (C_7H_{16}) ou l'octane (C_8H_{18}).

I -2-4-Parc de stockage :

Le parc de stockage C'est une zone généralement de grande surface où se situe un ensemble des bacs de stockage. Ils peuvent être de différente ou de même capacité. Ils sont bien sûr connectés à une canalisation d'entrée et une autre de sortie et éventuellement connectés entre eux. Nous pouvons diviser le groupe des bacs en trois, en fonction de leurs états :

- Premier groupe en phase de remplissage.
- Deuxième groupe en phase de décantation.
- Troisième groupe en phase de vidange.

I-3-Types du réservoir de stockage des hydrocarbures :

I-3-1-Réservoir cylindrique verticaux :

Ils reposent directement sur le sol ou sur une fondation par l'intermédiaire d'un fond plat. Ils sont habituellement équipés soit d'un toit fixe conique ou sphérique, soit d'un toit flottant qui repose sur le liquide et coulisse dans le piston formé par la robe du réservoir.

Lorsque ces réservoirs doivent supporter une légère pression, leur toit est généralement de forme sphérique et leur fond en périphérie peut être ancré sur une fondation circulaire en béton. Pour éviter ces ancrages et la fondation

qu'ils impliquent, le fond plat peut être remplacé par un fond sphérique concave qui équilibre les effets de la pression sur le toit.

I-3-2-Principaux éléments constitutif :

- Un fond
- Une robe
- Un toit
- Différents accessoires

I-3-2-1-Le fond de bac :

Le fond de bac est construit en plaque de tôle se recouvrant aux extrémités où elles sont soudées entre elles, reposent souvent sur une galette de gravier ou de sable revêtue d'un enrobé bitumineux permettant une étanchéité et une adaptation au contact de l'assemblage des tôles de fond doit être conçu pour permettre une vidange complète, ainsi que les purges d'eau et de dépôts

I-3-2-2-La robe :

La robe de bac est constituée par un empilage vertical de bandes de tôle soudées bout à bout, de largeur 1,8 à 2,4 m et de longueur pouvant atteindre 10 m. Le schéma ci-dessous montre que l'épaisseur de la robe varie de la basse au sommet.

I-3-2-3-Le toit :

Le sommet des bacs est recouvert d'un toit qui peut être soit fixe, soit flottant, on trouve également le bac à toit fixe muni d'un écran flottant en contact avec le produit

a-Réservoir à toit fixe :

Le stockage des produits peu volatils et à faible tension de vapeur (inférieure à 1 bar) est réalisé dans des réservoirs où la partie supérieure est recouverte d'un toit fixe. Ce dispositif permet d'empêcher leur contamination par des agents extérieurs (pluie, poussières,...).

La présence du toit fixe assure une rigidité suffisante au sommet de la robe qui permet d'éviter l'installation d'un raidisseur,

On classe les réservoirs à toit fixe en deux catégories :

- Réservoirs à toit supporté;
- Réservoirs à toit autoportant.

Ces toits sont constitués d'une charpente soutenue par un ou plusieurs poteaux (pour des diamètres supérieurs à 25 mètres) qui s'appuient sur le fond du réservoir.

Les toits autoportants sont soit coniques soit sphériques.

b-Réservoir à toit flottant :

Ils sont utilisés pour le stockage des produit volatils (pétrole brut, condensat, carburants auto...etc.) ils ressemblent au réservoir à toit fixe sauf dans la conception du toit. Le toit dans ce cas repose directement sur le liquide et flotte au-dessus cela grâce à des double fonds constituant des poches d'air indépendantes réduisant ainsi le poids spécifique de l'ensemble du toit par rapport à celui du liquide. La circonférence du toit est rendue étanche par des bandes en caoutchouc glissant sur la paroi interne de la robe du réservoir, ce qui réduit les pertes par évaporation du produit. Ce dispositif étanchéité permis par ailleurs le déplacement du toit. Lorsque le toit repose sur le fond du réservoir, il repose sur des supports spéciaux (béquilles)

Il existe deux types de réservoirs à toit flottant :

- **Réservoirs à toit flottant externe**

Dans ce cas le toit est installé à l'air libre, La face inférieure du toit est complètement mouillée par le liquide sur lequel le toit flotte. Pratiquement aucun espace vapeur n'existe, ce qui permet de réduire considérablement les pertes par évaporation et les risques d'incendie.

- **Réservoirs à toit flottant interne**

le toit est placé à l'intérieur de réservoir à toit fixe.

Ce sont des réservoirs à toit fixe dans lesquels est installé un toit flottant simplifié également appelé écran flottant. Le toit fixe peut être soit de type supporté, avec poteaux verticaux à l'intérieur du réservoir, soit du type autoportant sans poteaux. Lorsque la structure comporte des poteaux, ils traversent le toit flottant par des puits équipés de joints d'étanchéité des puits. Ces réservoirs sont particulièrement bien adaptés pour le stockage des produits volatils dont il faut assurer la conservation, préserver la pureté ou limiter l'émission des vapeurs vers l'atmosphère.

Le toit flottant peut être de deux types :

- à flotteur unique
- à double flotteur

b-1-toit a flotteur unique (simple pont) :

Il est constitué par une surface centrale de plaques avec une couronne circulaire soudée sur sa périphérie composée de caissons étanches flottants.

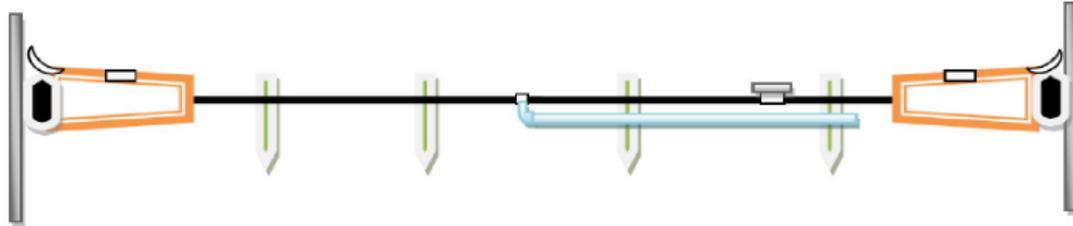


Figure 1 : toit flotteur a simple pont

b-2-toit double flotteur (à double pont) :

Il est constitué par deux surfaces de tôles circulaires. L'une recouvre l'autre et séparées l'une de l'autre par des cloisons ou des charpentes de façon à créer un matelas d'air entre le produit stocké et l'atmosphère.

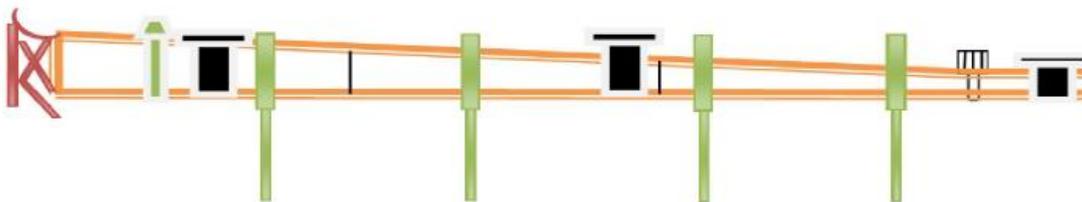


Figure 2 : toit flotteur a double pont

I-3-2-4-accessoires

a-Bague de renforcement :au-dessus de la robe avec une main courante qui à deux rôles : augmenter la rigidité de la partie supérieure de la robe et permettre l'accès autour du toit.

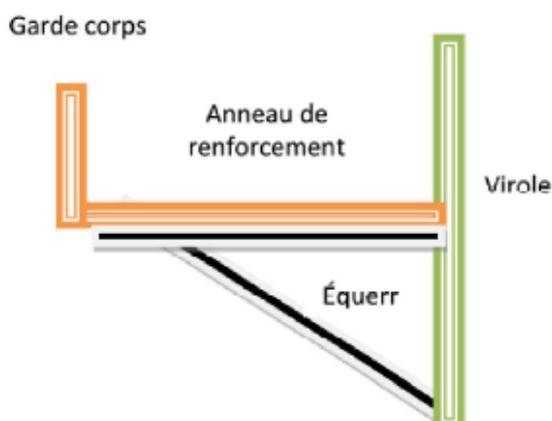


Figure 3 : bague de renforcement

b-Plate-forme supérieure : Elle se trouve au-dessus de la bague de renforcement et à laquelle est fixée une échelle coulissante sur des glissières fixées sur le toit flottant.

c- Event : pour la zone périphérique qui permet aux gaz excédentaires qui ont été formés de s'échapper.

d-Clapet d'aération automatique : il s'ouvre lorsque le toit repose sur le fond. Il a les mêmes fonctions que celles des événements décrites pour les événements dans les réservoirs à toit fixe.

e-Systèmes de joint:

L'étanchéité entre le toit flottant et la robe du bac est assurée par des joints qui peuvent être réalisés de différentes manières:

- **Joint mécanique :** Des patins d'acier viennent racler la paroi. L'étanchéité est réalisée par un joint élastomère flexible situé au-dessus du liquide et ne subissant pas de contrainte. Le joint est maintenu appliqué contre la paroi par un contre poids

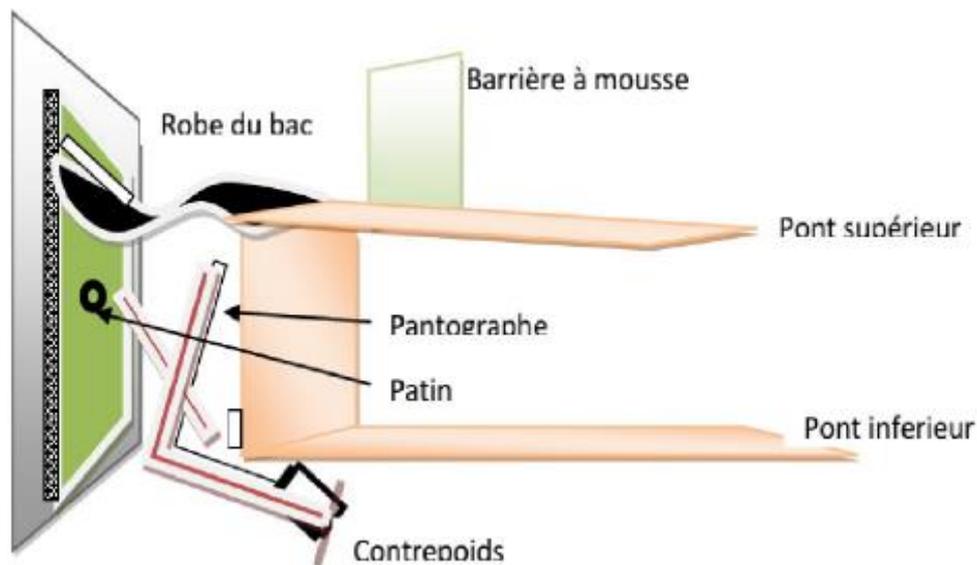


Figure 4 : joint mécanique

-Joint liquide : L'étanchéité entre la robe et le toit est maintenue par un "boudin" rempli de kérosène ou de gazole

f-Système d'évacuation des eaux de pluie :

L'eau s'accumule au centre du toit et est évacuée à l'aide d'un tube articulé placé dans le réservoir pour être évacué par une prise de soutirage se trouvant dans le fond de la robe. De plus, en cas de bouchage de ce système, un drain de sécurité permet à l'eau de s'écouler dans le produit afin d'éviter que le toit coule.

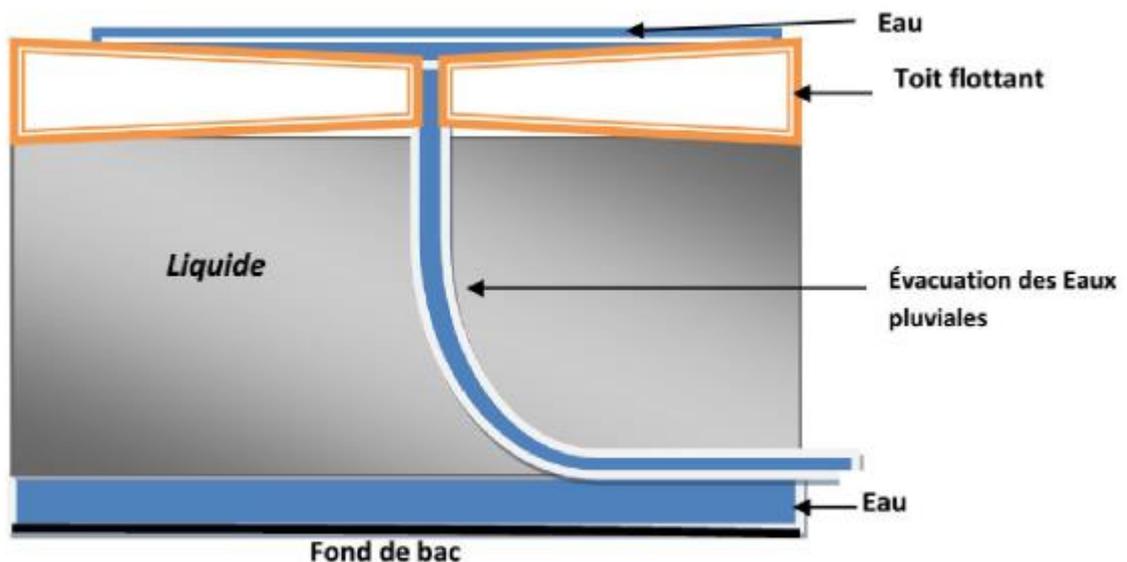


Figure 5 : Système d'évacuation des eaux pluviales

j-les béquilles : Lorsque la hauteur du liquide ne permet plus de maintenir le toit en flottaison, son supportage est assuré par des béquilles.

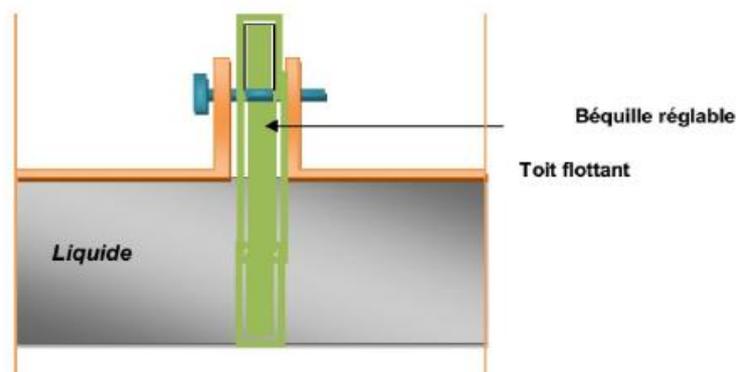


Figure 6 : les béquilles

k-Déversoir d'injection de la mousse :

Injection à l'extérieur d'un bac à toit flottant, sur le joint d'étanchéité. Une couronne métallique soudée sur le toit permet de retenir la mousse sur la périphérie afin de recouvrir le joint

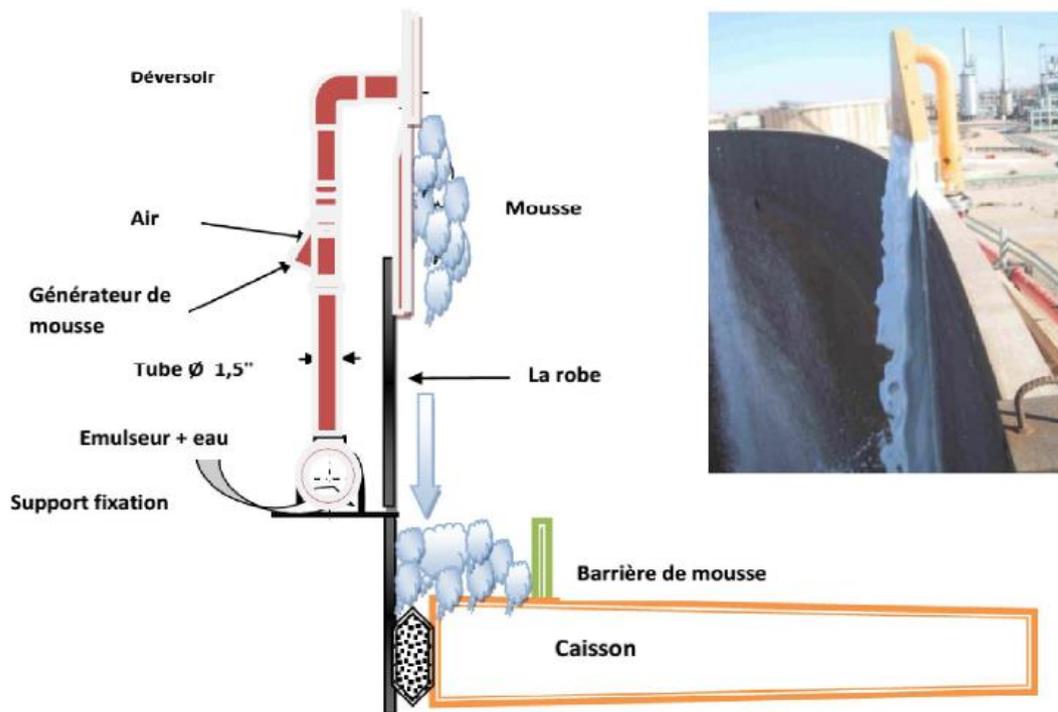


Figure 7 : déversoir d'injection de mousse

I-3-2-Réservoirs sphériques :

Dans ce type de réservoir, adapté au stockage sous pression des produits sous phase liquide tels que le propane, le butane, leurs capacité unitaire est comprise entre 200 m³ et 5000 m³ mais des ouvrages de capacité supérieures pouvant atteindre 10 000 m³ sont réalisés. La masse stockée varie selon la densité de la phase de liquide de produit stocké. Pour une sphère de 1000 m³, la masse varie de 400 t (propanes) à 700 t (oxydes d'éthylène).

L'épaisseur de la paroi est en fonction de la dimension d'ouvrage, de la TV du produit stocké à la température maximale de l'étude, des caractéristiques mécanique des aciers mise en œuvre et de la sévérité des codes d'étude ou des réglementations locales .

Ce réservoir doit résister à des pressions internes de 8-9 bars pour le butane jusqu'à 25 bars pour le propane.



Figure 8 : bac de stockage sphérique

I-3-3-Réservoir cylindrique horizontale :

Souvent, ils sont installés au-dessus du sol sur des berceaux supports. Leurs extrémités sont terminées par des fonds emboutis hémisphériques ou elliptiques. Ces récipients sont destinés aux stockages sous forte pression, mais leur emploi est limité en général à de faibles capacités.

Les réservoirs horizontaux sont principalement utilisés dans les cas où la consommation de fluide est faible et où le poids spécifique du fluide en question est faible. Ce type de réservoirs cylindriques est susceptible de stocker les mêmes produits que les sphères.

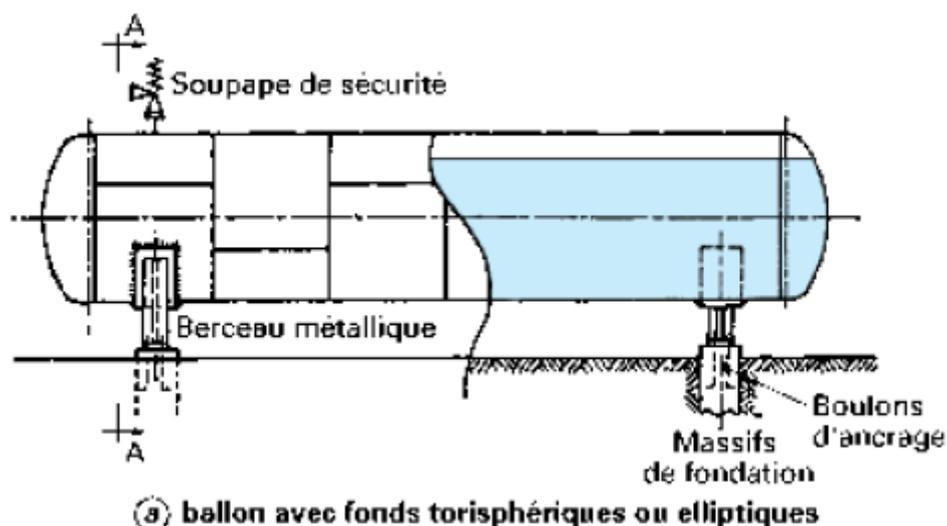


Figure 9 : réservoir cylindrique horizontale

I-3-4-Réservoir cryogénique :

Ces unités de stockage comprennent nécessairement une isolation thermique performante qui enrobe complètement le conteneur froid pour empêcher le réchauffement du produit réfrigéré.

Ces réservoirs, malgré leurs dimensions souvent respectables, sont cependant plus satisfaisants sur le plan de la sécurité pour l'environnement que les unités de gaz liquéfiés sous pression.

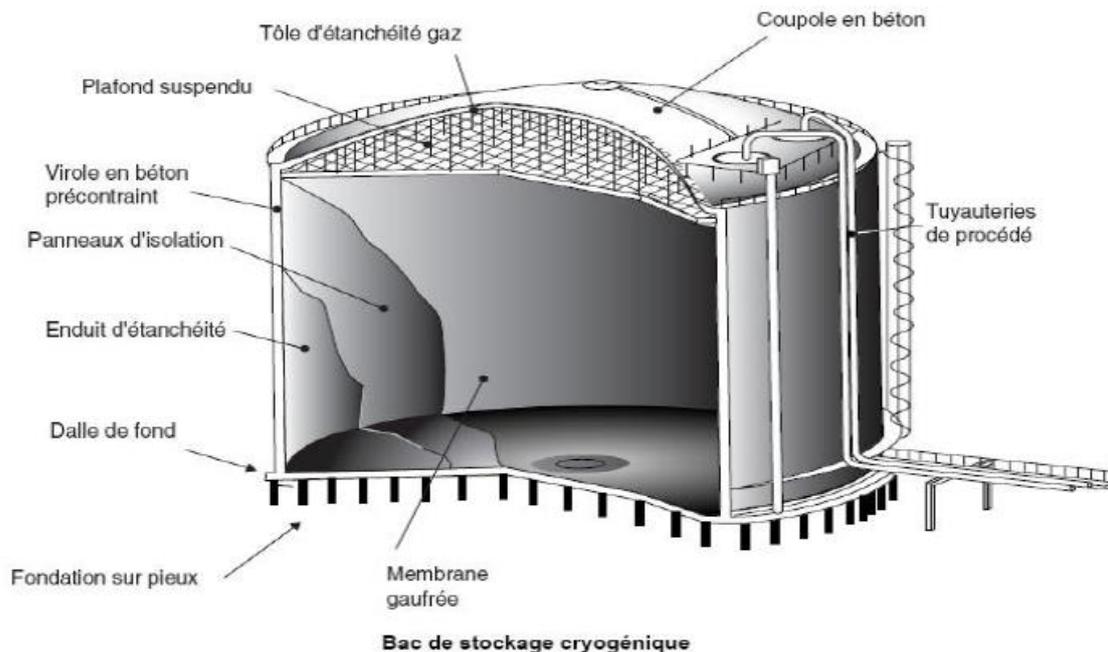


Figure 10 : bac de stockage cryogénique

I-4-Modes de stockage

La géométrie des réservoirs dépend étroitement de la nature du produit stocké et de sa volatilité à la température de stockage. Cette volatilité étant connue, différents modes de stockage peuvent être envisagés. On peut les classer en fonction de la pression et de la température de fonctionnement du liquide stocké.

- **Liquides volatils qui ne bouillent pas à température ambiante :**

Leur point normal d'ébullition est supérieur à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à l'ambiant est inférieure à 1,013 bar.

A température ambiante T_a , la pression effective au-dessus du liquide est donc nulle. Le stockage s'effectue sous pression atmosphérique ou sensiblement atmosphérique à température ambiante (stockage libre).

- **Liquides volatils qui bouillent à des températures inférieures ou égales à la température ambiante :**

Leur point normal d'ébullition est inférieur ou égal à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à l'ambient est supérieure ou égale à 1,013 bar. A température ambiante T_a , une pression effective existe donc au-dessus du liquide.

I-4-1-Trois modes de stockage peuvent être envisagés :

I -4-1-1-Stockages sous pleine pression :

Ils sont réalisés avec des réservoirs directement exposés à l'air ambiant sans isolation thermique; la température du produit stocké est voisine de la température du site et la pression d'exploitation est maximale.

Ce mode de stockage est réservé aux gaz liquéfiés qui, à température ambiante, développent de fortes pressions. Il consiste à stocker ces produits sous une pression d'exploitation réduite obtenue par abaissement de leur température au moyen de machines frigorifiques.

I -4-1-2-Stockages réfrigérés et cryogéniques :

Ils fonctionnent sous pression d'exploitation pratiquement nulle obtenue par abaissement de la température du produit jusqu'à son PNE. Ils sont pourvus d'un système isolant dimensionné pour maintenir le produit à basse température.

Par ailleurs, avec ce mode de stockage, la quantité de produit stocké est plus grande, car la densité des liquides est maximale au PNE.

Cette caractéristique constitue un avantage essentiel pour le transport sur grande distance.

Par convention, on désigne par stockages réfrigérés, les réservoirs dont la température minimale est supérieure à -60°C car, jusqu'à cette température, les réservoirs peuvent être réalisés avec des aciers au carbone classiques. Les réservoirs cryogéniques couvrent la gamme

de températures comprise entre -60 et -273°C . Ils sont construits avec des matériaux beaucoup plus résilients tels que les aciers alliés au nickel (5 à 9 % de Ni), les aciers inoxydables et les alliages d'aluminium.

I -4-1-2-Stockage semi-réfrigérés :

Il fonctionnent sous pression d'exploitation réduite , obtenue par abaissement de la température du produit et comprennent une isolation thermique pour limiter l'entrée de la chaleur , leurs pression est limitée à une valeur intermédiaire comprise entre la pleine pression a température ambiante et la pression atmosphérique , ce mode de stockage est réservé aux gaz liquéfiés qui à température ambiante développent de forte pression , il consiste à stocker ces produits sous une pression d'exploitation réduite obtenue par abaissement de leur température au moyen de machine frigorifiques .

I-5-Conclusion

Le stockage des produits pétroliers doit reprendre aux normes et à la réglementation internationale en cours pour éviter les accidents et les risques industriels.

II-1- Définition du risque :

Le risque est un concept familier dans de nombreux domaines et activités, notamment l'économie, les affaires, le sport, l'industrie, mais aussi dans la vie de tous les jours, mais il n'a pas toujours la même signification.

Une définition stricte est cependant nécessaire lorsque le terme est utilisé dans un environnement professionnel. Différentes définitions ont été proposées, par exemple : "une situation qui peut conduire à une conséquence négative non souhaitée dans un événement donné" ; "la probabilité qu'un danger potentiel se produise" ; "les conséquences non désirées d'une activité donnée, par rapport à leur probabilité d'occurrence" ; ou encore, de façon plus générale, "la probabilité d'un accident". Probabilité d'occurrence" ; ou, plus spécifiquement, "une mesure des dommages humains, des dommages à l'environnement ou des pertes économiques en termes à la fois d'ampleur et de gravité".

Afin d'effectuer une évaluation approfondie des risques, il est important d'établir d'abord une définition précise permettant de quantifier le risque.

Définition précise grâce à laquelle le risque peut être quantifié. Selon la définition actuellement acceptée, le risque est calculé en multipliant la fréquence à laquelle un événement se produit (ou se produira) par l'ampleur de ses conséquences probables.

$$R = F \times G$$

Cette définition du risque est très pratique, mais elle crée aussi plusieurs difficultés. La première d'entre elles est d'établir les unités dans lesquelles le risque est mesuré, car il ne peut s'agir uniquement de décès ou de cout par unité de temps. : Les conséquences peuvent également être mesurées en termes de blessures aux personnes ou de dommages à l'environnement et de matériels, qui sont plus difficiles à évaluer. Il est également difficile d'estimer la fréquence d'occurrence d'un type d'accident donné et l'ampleur de ses conséquences. Heureusement, ces difficultés peuvent être surmontées en appliquant des méthodologies appropriées qui peuvent être utilisées pour obtenir une estimation finale du risque.

Lors de l'analyse du risque d'un accident donné, il est probable que les valeurs exactes ne seront pas connues pour certaines variables, par exemple les conditions de la matière libérée (température, pression, etc.). les conditions météorologiques (vitesse et direction du vent). En outre, il est souvent difficile de prédire avec précision certaines circonstances spécifiques liées à la source

de l'accident. par exemple, si l'accident est causé par la perte de confinement d'un fluide à travers un trou dans un pipeline ou un bac de stockage, alors qu'il est seulement possible de deviner la taille et l'emplacement du trou.

Les risques sont généralement classés en trois catégories pour les activités industrielles :

- **Risques conventionnels** : ceux liés aux activités et aux équipements que l'on trouve généralement dans la plupart des industries.
- **Risques spécifiques** : ceux associés à la manipulation ou à l'utilisation de substances qui sont considérées comme dangereuses en raison de leurs propriétés et de leur nature (par exemple, les substances toxiques ou radioactives).
- **Risques majeurs** : il s'agit d'accidents exceptionnels et de situations dont les conséquences peuvent être particulièrement graves car de grandes quantités d'énergie ou de substances dangereuses peuvent être libérées pendant une courte période.

Les risques conventionnels et spécifiques touchent généralement les employés sur site. Comme ces types de risques ne sont pas liés à des situations exceptionnelles, ils sont relativement faciles à prévoir et peuvent être évités ou atténués par la mise en œuvre de mesures de sécurité standard. Cependant, les effets des risques majeurs peuvent couvrir des distances beaucoup plus grandes, ce qui signifie qu'ils peuvent également affecter la population extérieure et sont souvent plus difficiles à prévoir et à évaluer. Par conséquent, un ensemble de méthodologies a été développé pour analyser et quantifier ces risques. Ces méthodologies sont désignées par le terme de : **analyse des risques** .

II-2- analyse des risques :

L'analyse des risques permet d'évaluer les différents types de risques associés à une installation industrielle donnée, à une activité particulière ou au transport de matières dangereuses.

Les méthodes d'analyse des risques peuvent fournir des estimations raisonnablement précises des accidents potentiels, de la fréquence de ces accidents et de l'ampleur de leurs effets et conséquences.

La première étape consiste à identifier les types d'accidents potentiels. Dans ce cas, il faut d'abord analyser les événements externes, c'est-à-dire les dangers extérieurs au système étudié.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

La première étape de l'évaluation des dangers associés au système analysé consiste à appliquer une analyse historique. L'analyse historique consiste à étudier les accidents antérieurs survenus dans des systèmes similaires à celui analysé. Il s'agit essentiellement d'une approche qualitative, bien que dans les cas où le nombre d'accidents est suffisamment important, une analyse statistique puisse être utilisée pour obtenir des résultats numériques ou quantitatifs.

L'analyse historique est généralement réalisée à partir d'une base de données d'accidents. Elle permet d'identifier les points faibles d'un système ou les types de défaillance auxquels on peut s'attendre sur la base de l'expérience passée. Elle constitue un outil essentiel pour établir les données de base nécessaires à l'analyse des risques, telles que les fréquences des événements initiateurs. Ces informations sont essentielles pour valider et améliorer les modèles mathématiques d'accidents majeurs et les modèles de vulnérabilité.

- **l'analyse HAZOP (hazard and operability)** : c'est un outil puissant pour identifier les accidents potentiels. Elle consiste en une analyse critique, et systématique d'une usine de traitement ou d'un projet d'ingénierie pour évaluer le risque potentiel dérivé du fonctionnement anormal ou de la défaillance de composants individuels et les effets qui en résultent sur l'ensemble du système. La procédure est basée sur l'évidence que les écarts par rapport aux conditions normales de fonctionnement conduisent souvent à une défaillance du système : lorsqu'un accident se produit, une ou plusieurs variables du processus se sont écartées de leurs valeurs normales

HAZOP est réalisé par une équipe qui analyse toutes les déviations possibles des variables de fonctionnement dans les différents nœuds de l'unité étudiée. Un ensemble de mots guides (non, moins, plus, autre que, etc.) est appliqué aux différentes variables de fonctionnement (débit, niveau, température, pression, etc.) afin d'identifier les conséquences possibles de tous les écarts.

L'analyse HAZOP réduit la fréquence des défaillances ou des accidents dans une unité particulière car elle identifie les accidents potentiels qui peuvent se produire et les mesures de sécurité supplémentaires nécessaires.

Une fois les dangers sont identifiés, il est nécessaire de quantifier leurs effets et leurs conséquences. Des modèles mathématiques des différents types d'accidents sont utilisés pour établir les effets (l'intensité du rayonnement thermique d'un incendie, la suppression d'une explosion ou la concentration d'un matériau libéré dans l'atmosphère).

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

Les conséquences d'un accident sont estimées en déterminant l'intensité de ses effets par rapport à la distance à laquelle ils se font sentir et en identifiant la répartition des éléments vulnérables (population, équipements, etc.)

Si l'analyse se conclut à ce stade, elle peut être considérée comme une approche déterministe, c'est-à-dire qu'elle établit les accidents potentiels et estime leurs effets et conséquences. Cependant, une étape supplémentaire est nécessaire pour évaluer le risque de manière plus complète, à savoir l'estimation des fréquences attendues des différents scénarios d'accidents potentiels, Cela peut être fait en établissant et en résolvant les arbres de défaillance et les arbres d'événements appropriés.

-L'arbre de défaillance : est une représentation schématique de l'enchaînement logique des événements qui doivent se produire afin d'atteindre un événement supérieur, c'est-à-dire un accident donné. En appliquant cette technique, il est possible de descendre d'un événement assez improbable (l'accident) à des événements primaires tels que la défaillance d'une vanne ou d'un dispositif de contrôle. Ces événements sont relativement fréquents dans les usines de traitement et leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence est connue. Par conséquent, une fois que l'arbre de défaillance a été construit, il est possible de combiner logiquement ces valeurs pour fournir une estimation raisonnablement précise de la fréquence à laquelle l'événement ou l'accident principal se produira. Les arbres de défaillance peuvent également être obtenus à partir de l'analyse HAZOP

-Les arbres d'évènements : sont des représentations graphiques des différentes séquences qui mènent d'un événement déclencheur (par exemple, une perte de confinement due à un trou dans un pipeline) à divers scénarios d'accident (feu de nappe, nuages inflammables ou explosions). Les séquences suivent les différentes branches d'un arbre, en fonction du succès ou de l'échec des différentes mesures prises pour prévenir la situation d'urgence (par exemple, les mesures de prévention des incendies). Pour prévenir l'urgence (par exemple, l'activation d'un système de pulvérisation d'eau ou l'intervention d'un opérateur) ou des différentes mesures prises pour prévenir l'urgence.

- Le risque est estimé à partir de la gravité des conséquences et de la fréquence d'occurrence d'un accident. D'occurrence d'un accident. Il peut être utilisé pour calculer le risque individuel et le risque de la société sur l'aire d'influence d'une installation ou d'une activité donnée et de tracer des lignes d'iso-risque pour le risque individuel.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

C'est l'analyse quantitative du risque (QRA). Une fois cette analyse effectuée, si le risque est considéré comme trop élevé, l'installation ou le projet doit être modifié pour augmenter la sécurité jusqu'à ce qu'un niveau de risque tolérable soit atteint.

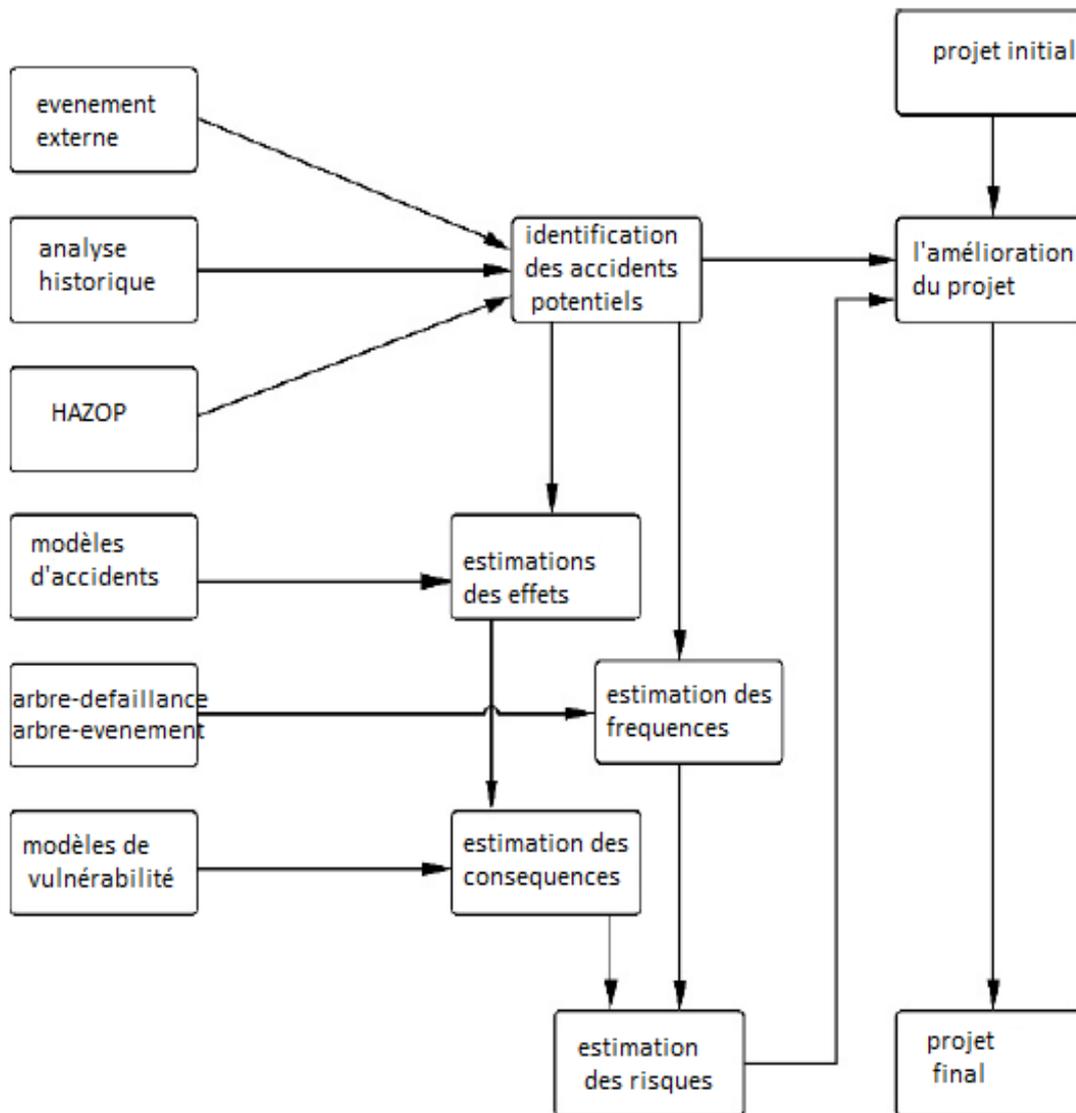


Figure 1 : les étapes de l'analyse des risques

II-3- Les accidents majeurs :

Les accidents majeurs ont été définis comme "un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion majeurs résultant de développements incontrôlés dans le cadre de l'exploitation de tout établissement ... et

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

entraînant un danger grave pour la santé humaine et/ou l'environnement, immédiat ou différé, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et impliquant une ou plusieurs substances dangereuses". Les accidents majeurs impliquent la libération de quantités importantes d'énergie ou d'une ou plusieurs matières dangereuses.

Les accidents majeurs sont associés à un ou plusieurs des phénomènes dangereux suivants :

- thermique : rayonnement thermique
- mécanique : éjection de fragments
- chimique : libération de matières toxiques.

II-3-1-dommage:

L'ampleur de l'accident dépendra de différents paramètres :

- **L'inventaire.** :La masse ou l'énergie directement impliquée dans un accident est proportionnelle à la quantité de matière présente dans l'installation dans laquelle l'accident a lieu, soit pourquoi la réduction des stocks de matières dangereuses est toujours une mesure de sécurité positive .
- **L'énergie** : L'ampleur des conséquences d'un accident est proportionnelle à la quantité d'énergie contenue dans un système (énergie de pression, chaleur de combustion).
- **Le temps** : L'ampleur des conséquences est inversement proportionnelle au temps pendant lequel une quantité donnée d'énergie ou de matières dangereuses est libérée : l'intensité du phénomène à une distance donnée sera plus élevée et la possibilité de s'échapper diminuera.
- **L'exposition** : Le degré d'exposition peut avoir un effet considérable sur les conséquences d'un accident sur les personnes qui se trouvent à proximité. L'exposition est également liée à la distance entre la population et la source de l'accident. S'il y a une distance raisonnable, l'intensité des effets qui atteignent les personnes du voisinage sera beaucoup plus faible que si la population est située à proximité de l'industrie. C'est un facteur clé de la gravité des conséquences d'accidents majeurs.

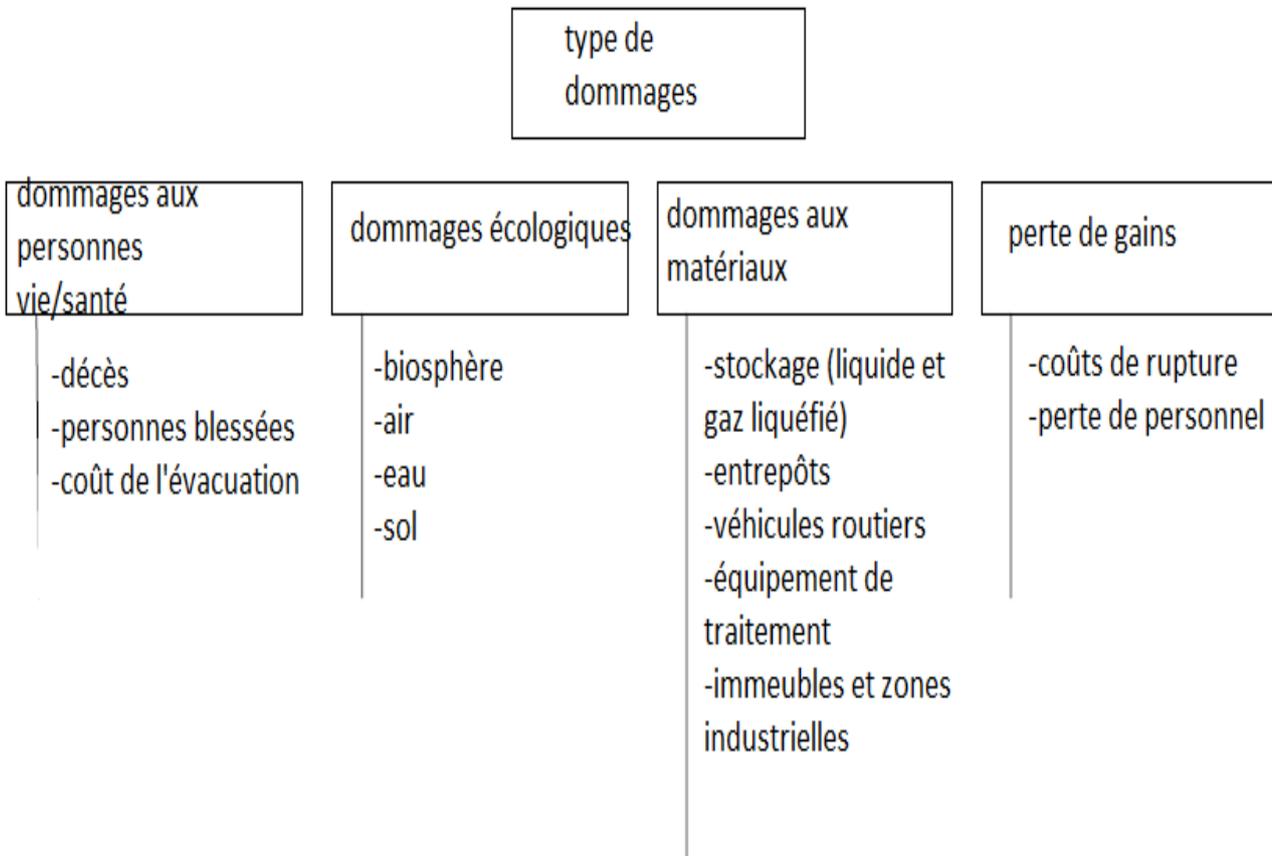


Figure 2 : Dommages potentiels dérivés d'accidents majeurs

-Les dommages matériels : comprennent toutes les pertes financières découlant des dommages subis par les équipements et les besoins de remplacement. Le manque à gagner provient de l'arrêt de certaines installations après l'accident. L'importance de ces pertes dépend du temps nécessaire à la reprise d'une activité normale. Cette catégorie comprend également certains coûts attribués à l'atteinte à l'image de l'entreprise, bien que ceux-ci soient évidemment difficiles à quantifier. Les équipements (unités de traitement, bâtiments, véhicules, etc.) sont endommagés par les explosions et tous les types d'incendie. Enfin, nombre de ces accidents interrompent l'activité sur l'ensemble de la zone touchée, ce qui entraîne un manque à gagner pendant une certaine période. Les données historiques obtenues de diverses sources indiquent une tendance à l'augmentation des accidents graves, dont le coût moyen augmente considérablement chaque année.

II-4-effet domino :

L'effet domino a été défini comme une cascade d'événements dans laquelle les conséquences d'un accident antérieur sont aggravées conduisant à un accident majeur. Un effet domino implique un événement primaire qui affecte une installation primaire, laquelle induit un ou plusieurs accidents secondaires qui affectent d'autres installations. La propagation des dommages peut être soit spatiale (des zones non concernées par l'accident primaire sont endommagées), soit temporelle (la même zone est concernée mais les événements secondaires sont retardés), soit les deux. Les installations impliquées dans un effet domino peuvent appartenir ou non au même établissement.

II-4-1-Classification des effets domino

L'analyse historique a montré que les effets dominos peuvent être classés selon deux critères : le type d'installations primaires et secondaires concernées et la nature des effets physiques primaires et secondaires qui se produisent.

Les types d'installation les plus fréquemment touchés par les effets domino sont : les réservoirs de stockage sous pression, les réservoirs de stockage atmosphérique ou cryogénique, les équipements de traitement, les réseaux de canalisations et les zones de stockage solide.

Les effets primaires peuvent être thermiques ou mécaniques. Par exemple, Explosion de vapeur (UVCE) suivie par un rejet de matières inflammables peut provoquer la rupture d'un équipement ou un jet fire peut provoquer l'explosion d'un réservoir. Les effets secondaires peuvent être thermiques, mécaniques ou toxiques.

Un exemple :

Un exemple de l'effet domino s'est déroulé dans une usine pétrochimique à Priolo (Italie) en 1985 , La défaillance d'un instrument dans le rebouilleur d'une colonne de distillation a provoqué une augmentation de la température qui a activé une soupape de sécurité.

Le claquement de la soupape de sécurité a entraîné une libération de gaz inflammable. Le gaz s'est enflammé provoquant un jet fire, qui a été intensifié par le gaz libéré d'une fuite d'un pipeline d'un diamètre de 150 mm. Le jet fire a atteint un autre pipeline de 600 mm de diamètre situé à une distance de 16 m, qui contenait de l'éthylène à 18,2 bars et qui était relié à une autre colonne de distillation. Une boule de feu a été produite, suivie d'un très grand jet fire.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

Le jet fire secondaire a touché le fond d'un ensemble de huit réservoirs de stockage cylindriques situés à une distance de 60 m et qui contenaient du GPL. Un des réservoirs a subi une explosion BLEVE suivie d'une boule de feu ; la quantité de GPL en jeu était d'environ 50 000 kg et le centre de la boule de feu a atteint une hauteur de 250 m au-dessus du sol. Le réservoir s'est brisé en plusieurs fragments et les deux plus gros ont été propulsés à des distances de 25 m et 125 m de l'emplacement initial du réservoir. Des fragments plus petits ont été éjectés à des distances allant jusqu'à 700 m. L'impact de ces fragments a provoqué la chute de trois autres réservoirs de stockage sur d'autres équipements.

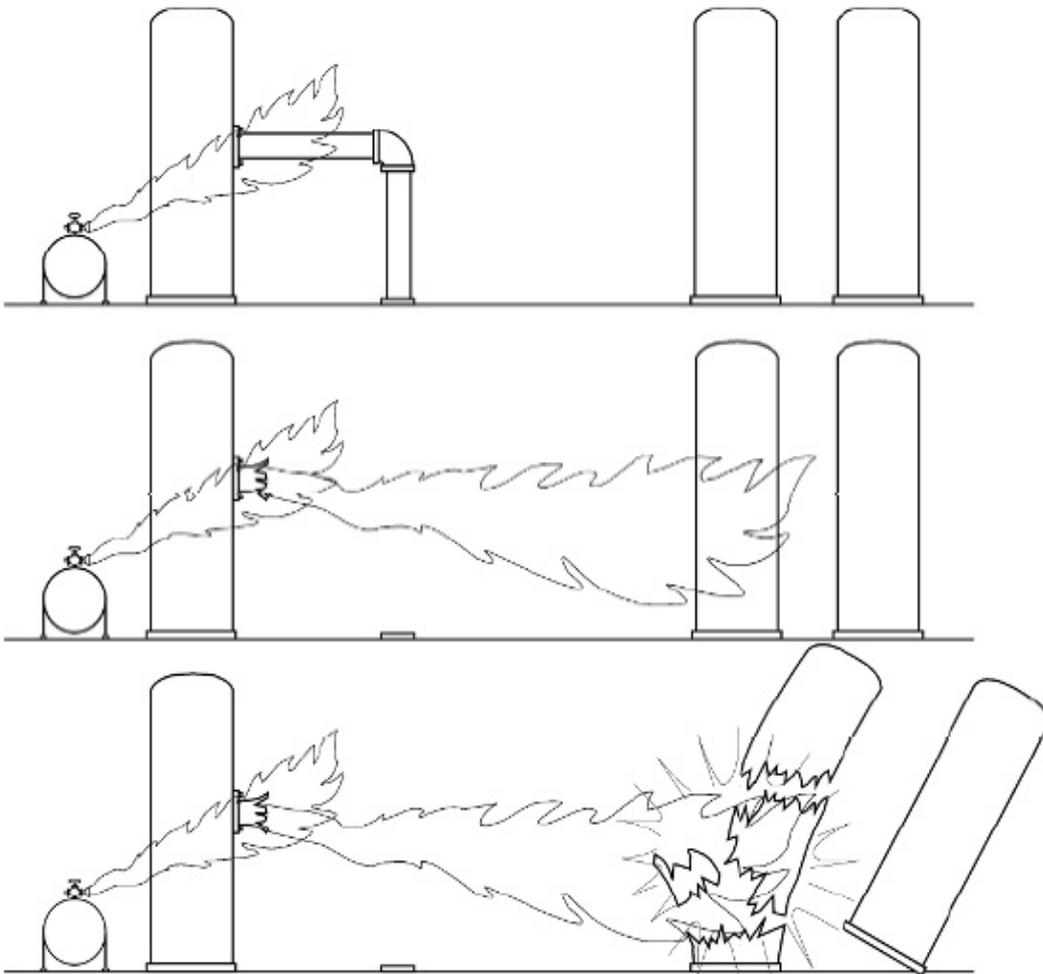


Figure 3 : Exemple sur les effets domino

II-5-Les sources des accidents :

Les accidents majeurs commencent toujours par une perte de confinement. Une matière contenue à l'intérieur d'un équipement (par exemple un réservoir,

une colonne de distillation ou un pipeline) s'échappe à l'atmosphère par une ouverture telle qu'un orifice, une fissure ou une vanne ouverte.

L'origine peut être la corrosion, un impact mécanique ou une erreur humaine. La perte de confinement elle-même peut également être un accident, comme dans le cas de l'explosion d'un réservoir sous pression. Une fois que la perte de confinement commence, l'évolution de l'événement dépendra d'une série de circonstances telles que l'état de l'installation, les conditions d'exploitation et l'état de la matière (gaz, liquide ou un mélange des deux), ses propriétés, les conditions météorologiques et les mesures prises pour atténuer la fuite. Afin de prévoir les effets et les conséquences d'un accident donné, nous devons calculer (ou, mieux, estimer) la vitesse à laquelle la matière sera libérée, la taille de la nappe de liquide qui se formera et la vitesse à laquelle le liquide s'évaporerait. Ces informations sont nécessaires pour appliquer des modèles mathématiques des différents phénomènes dangereux qui peuvent se produire (incendie, explosion, nuage toxique, etc.) et ainsi prévoir les effets physiques de l'accident (concentration, rayonnement thermique, etc.) en fonction du temps et de la distance.

II-6-Accidents et phénomène lié au stockage :

II-6-1-Les incendies

Parmi les différents accidents qui peuvent survenir dans l'industrie pétrolière, les incendies, en général, celui dont les effets couvrent des distances courtes : les nuages de gaz toxiques et les explosions couvrent généralement des zones beaucoup plus importantes. Cependant, les effets d'un incendie peuvent être graves car le flux thermique peut affecter d'autres équipements (effet domino), donnant ainsi lieu à d'autres événements qui peuvent augmenter considérablement l'ampleur de l'accident. En fait, dans de nombreux accidents majeurs survenant dans des usines de traitement des parcs de stockage ou lors du transport de matières dangereuses, l'incendie est une étape initiale, suivie d'une explosion. Ainsi, différentes combinaisons peuvent être observées : incendie + incendie plus important, incendie + explosion, incendie + nuage de gaz, incendie + BLEVE/boule de feu.

II-6-1-1-La combustion :

La combustion est une réaction chimique dans laquelle un combustible réagit avec un oxydant, générant divers produits et libérant de l'énergie. La combustion a toujours lieu en phase gazeuse : les combustibles liquides se vaporisent sous l'effet de la chaleur des flammes et réagissent ensuite avec l'oxygène de l'air ; les matières solides se décomposent en raison de la

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

température élevée et les gaz libérés réagissent avec l'oxydant, généralement l'oxygène de l'air. Les flammes sont ces gaz qui réagissent à haute température. Les produits de la combustion sont libérés sous forme de fumée, qui contient également du combustible non brûlé.

II-6-1-2-Le triangle de feu :

Le triangle du feu ou triangle de combustion est un modèle simple pour comprendre les éléments nécessaires pour la plupart des incendies.

Le combustible :

- Classe A - Bois, carton, papier, tissu, charbon... tout ce qui laisse des braises
- Classe B - Essence, white-spirit, fuel, huile, paraffine... ce qui brûle sans laisser de braises
- Classe C - Tous les gaz, propane, butane, acétylène, hydrogène, Méthane. ...
- Classe D - Les métaux finement divisés, en poudre ou en filaments, poudre d'aluminium, laine d'acier, uranium, zinc, magnésium, sodium...

Le comburant :

Oxygène de l'air, chlore, eau oxygénée, acide nitrique, oxylythe, acide sulfurique, nitrate de potasse, chlorates, perchlorates. ...

La source d'énergie :

- Mécanique due au frottement,
- électrique (foudre, électricité statique)
- chimique, biochimique, solaire.



Figure 4 : triangle de feu.

II-6-1-3-Réaction de combustion et chaleur de combustion :

Dans un incendie, l'énergie thermique est libérée par la combustion d'un combustible. La combustion est une réaction chimique exothermique dans laquelle une substance se combine avec un comburant, généralement l'oxygène de l'air. Le combustible peut être solide, mais la plupart des incendies dans l'industrie de transformation sont provoqués par des combustibles liquides ou gazeux. Une partie de l'énergie libérée est utilisée pour entretenir la réaction:

$$m = \frac{Q_F - Q_L}{q_v}$$

où : **m** est le taux de combustion **(kg m⁻² s⁻¹)**

Q_F est le flux de chaleur des flammes vers le combustible **(kW m⁻²)**

Q_L est la chaleur perdue par la surface du combustible **(kW m⁻²)**

q_v est la chaleur nécessaire à la production du gaz (la chaleur nécessaire pour porter sa température au point d'ébullition plus la chaleur latente d'évaporation dans le cas d'un liquide) **(kJ kg⁻¹)**

II-6-1-4-les types des incendies :

Les incendies qui peuvent se produire dans des installations industrielles ou lors du transport ou stockage de substances dangereuses peuvent être classés en fonction de l'état des combustibles et des conditions dans lesquelles l'inflammation aura lieu

Voici un diagramme simplifié indiquant les différents types d'incendie qui peuvent survenir à la suite de la perte de confinement d'une matière inflammable :

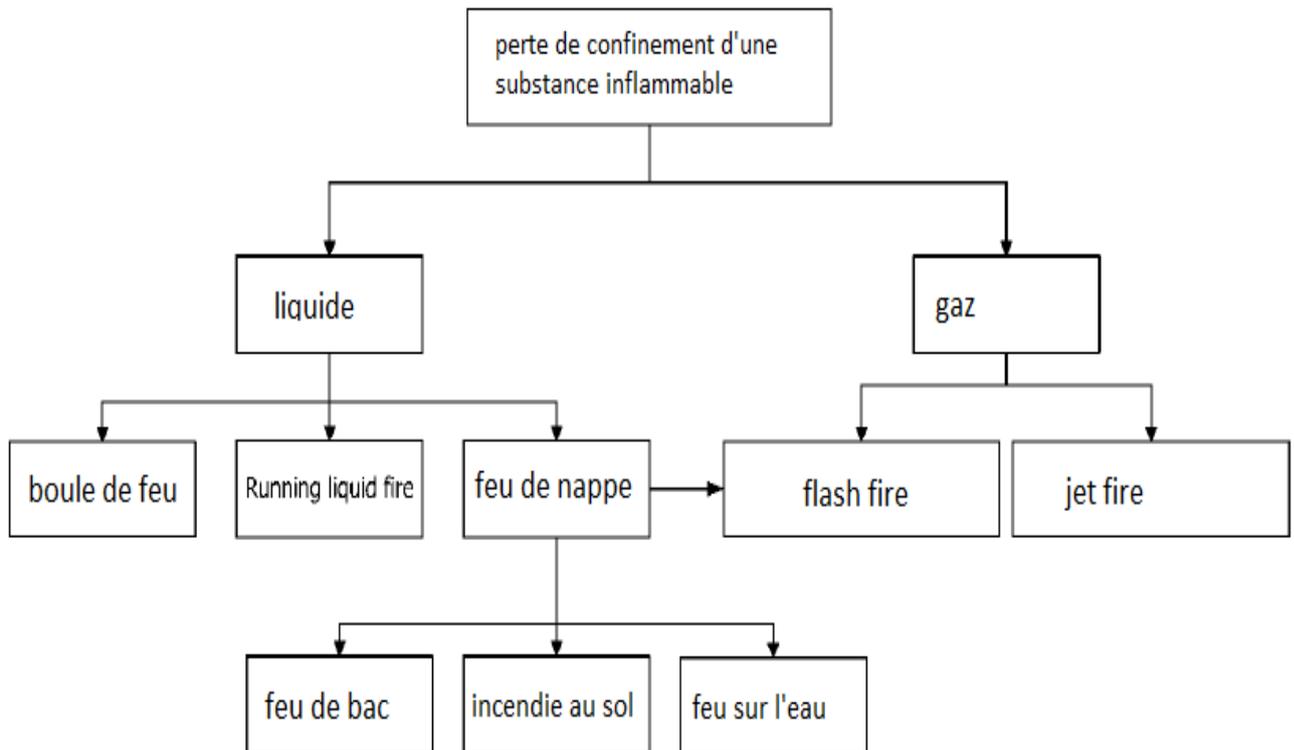


Figure 5 : Les types d'incendie qui peuvent se produire dans une installation industrielle.

a) feu de nappe :

Le terme « feu de nappe », ou « feu de flaque », décrit un incendie résultant de la combustion d'une nappe de combustible liquide en atmosphère libre. Ce phénomène implique principalement la surface de la nappe en contact avec l'air. Les dimensions et la géométrie de la nappe peuvent être tout à fait variables.

Il convient ainsi de distinguer :

- Les feux de réservoir : le feu est alors contenu dans une enceinte dont la surface est déterminée par les dimensions du réservoir ;
- Les feux de cuvette (de rétention) : l'extension de la nappe peut alors être limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé notamment par les exigences réglementaires applicables au stockage ;
- Les feux de flaque libre : en l'absence de moyens physiques prévus pour limiter l'extension de la nappe ou lorsque la cuvette de rétention n'est pas complètement envahie ; l'extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et des conditions de rejet du combustible.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

Le liquide reçoit la chaleur des flammes par convection et rayonnement et peut perdre ou gagner de la chaleur par conduction vers/depuis le substrat solide ou la couche liquide. Une fois que le feu atteint l'état d'équilibre, il existe un mécanisme de rétroaction qui contrôle l'alimentation des flammes en vapeur de combustible. La quantité de chaleur transférée entre le combustible et l'interface située en dessous dépend des conditions substrat du combustible. Si le substrat est de l'eau froide et que le combustible est un liquide initialement à température ambiante, les pertes de chaleur peuvent être importantes et la vaporisation du combustible peut diminuer à tel point que la flamme ne peut être maintenue. En revanche, si le combustible est cryogénique, la chaleur sera transférée du substrat au combustible - au moins dans la première période et la combustion peut être améliorée.

La vitesse de combustion est une fonction du diamètre de la nappe. **Blinov** et **Khudiakov** [1, 2] ont réalisé une étude expérimentale du comportement des feux en nappe avec des combustibles et des diamètres différents. Ils ont observé le même comportement pour tous les combustibles. Les taux de combustion les plus élevés correspondaient aux plus petits diamètres de la nappe, dans le régime laminaire. Les taux de combustion diminués à mesure que le diamètre augmentait, atteignant un minimum d'environ $D = 0,1 \text{ m}$ ($Re = 20$). Sur la plage $0,1 \text{ m} < D < 1 \text{ m}$ ($20 < Re < 200$) la vitesse de combustion a augmenté avec le diamètre de la nappe. Pour les plus grands diamètres ($D > 1 \text{ m}$, $Re > 200$), les flammes étaient complètement turbulentes et la vitesse de combustion était constante et ne dépendait pas du diamètre. Cette corrélation entre la vitesse de combustion et le diamètre de la nappe s'explique par la contribution relative des différents mécanismes au transfert de chaleur de la flamme au combustible liquide [3].

Dans les grands feux de nappe - de plus de 1 m de diamètre - de grandes quantités de suie sont produites en raison d'une mauvaise combustion. Cette suie donne aux flammes leur couleur jaune ; elle se refroidit ensuite et dégage une fumée noire qui absorbe le rayonnement de la flamme,

Les feux de nappe au sol se produisent lorsqu'une libération de combustible crée une nappe dans une digue ou sur le sol. Le rejet peut être instantané, par exemple suite à la rupture d'un réservoir, par exemple suite à une fuite par un trou. En l'absence de digue, le diamètre de la nappe dépendra du type de rejet, du taux de combustion et de la pente du sol. Dans le cas d'un rejet instantané, le liquide s'étale jusqu'à ce qu'il atteigne une barrière ou que tout le combustible ait brûlé. Dans le cas d'une fuite continue, la taille de la nappe augmente jusqu'à ce que le taux de combustion soit égal au débit de la fuite, atteignant ainsi un diamètre d'équilibre. Le combustible (généralement un

hydrocarbure) peut brûler sur une couche d'eau, généralement créée par l'intervention des pompiers. Si le feu brûle pendant un certain temps, l'eau peut bouillir, donnant lieu au phénomène connu sous le nom **de boilover en couche mince**. Dans les grands incendies de réservoirs, l'existence d'une couche d'eau peut conduire au **boilover**, qui est un phénomène dangereux.

Le feu de nappe peut également se produire à la surface de la mer. Dans ce cas, le transfert de chaleur du combustible vers l'eau peut être important et l'on peut arriver à une situation dans laquelle la flamme ne peut pas être maintenue. En outre, si l'allumage est retardé, le diamètre de la flaque augmente et son épaisseur peut atteindre une valeur minimale en dessous de laquelle l'allumage n'est plus possible.

b) Jet fire :

Sont des flammes de diffusion turbulentes provoquées par la combustion d'un gaz ou d'une vapeur inflammable libéré à une certaine vitesse par un trou. Le rejet n'est pas toujours accidentel : les torches sont largement utilisées dans les usines de traitement pour éliminer en toute sécurité les gaz inflammables. Les feux à réaction entraînent de grandes quantités d'air dans la flamme, en raison de la turbulence du flux. En général, le volume d'air entraîné peut être jusqu'à cinq fois supérieur à celui requis pour une combustion stœchiométrique. En raison de l'efficacité du mélange et du meilleur taux de combustion, les températures dans les flammes le jet fire sont souvent plus élevées que celles atteintes dans les flammes de diffusion naturelle d'un feu de nappe. Par conséquent, le jet fire peut causer de graves dommages aux équipements, à la fois par rayonnement thermique et par impact des flammes.

c) Flash fire :

Si un gaz ou une vapeur inflammable est libéré dans certaines conditions météorologiques -calme ou faible vitesse du vent - un nuage se forme. Ce phénomène peut également être causé par la libération d'un liquide sous pression subissant une vaporisation éclair ou par évaporation d'une nappe , C'est le cas du gaz naturel liquéfié ou du propane liquéfié : si une flaque se forme, elle subira une vaporisation intense. Le dégagement peut être instantané ou continu. Le nuage inflammable va se disperser, augmenter en taille et se déplacer en fonction de la direction du vent. S'il rencontre une source d'ignition - un appareil électrique, une flamme, une étincelle électrostatique - la masse située entre les limites d'inflammabilité brûlera très rapidement, les flammes se propageant dans le nuage.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

La vitesse de propagation de la flamme pour les mélanges GPL-air est de l'ordre de $5-10 \text{ m s}^{-1}$ et augmente avec la vitesse du vent.

La durée du phénomène est très courte (quelques dizaines de secondes), la zone couverte par le mélange inflammable sera soumise à un très fort flux de chaleur, tandis qu'en dehors de cette zone, les effets du rayonnement thermique seront fortement réduits et, dans la pratique, sont souvent considérés comme négligeables. Si la masse de combustible dans le nuage est importante, un souffle significatif peut également se produire ; dans ce cas, l'accident est considéré comme une explosion plutôt que comme un flash fire.

II-6-2- Les explosions :

Deux types d'explosions se distinguent :

- une explosion résultant d'une combustion à vitesse élevée : elle peut se produire, soit au sein même d'un produit ou engin explosif, soit au sein du mélange d'un gaz ou de poussières inflammables avec l'air. Dans ce dernier cas, une flamme se propage dans le mélange à une vitesse de 1 à 10 mètres par seconde selon la réactivité du combustible et les proportions du mélange. Cette flamme projette devant elle des ions propageant la réaction de combustion dans le mélange frais. Les gaz résultant de la combustion (CO_2 et H_2O notamment) sont répartis à l'arrière du front de flamme, sur laquelle ils exercent une poussée.
- une explosion résultant de l'augmentation excessive de la pression des gaz dans un contenant : elle peut produire un éclatement pneumatique, par exemple, ou de l'éclatement d'un réservoir clos (typiquement un réacteur), ou encore l'affaiblissement localisé de la résistance des parois d'un réservoir.

On observe aussi des explosions résultant de la mise en présence de substances chimiques dites "incompatibles", qui réagissent violemment entre elles.

II-6-2-1- Comment une explosion peut se produire :

Pour le cas d'une explosion de gaz ou de poussières, les causes sont les mêmes que celles de l'incendie. Les sources d'inflammation possibles sont variées :

- Flamme nue ou solide incandescent
- Point chaud provoqué par un effet Joule ou par une friction
- Foudre
- Etincelle électrique ou électrostatique

- Compression adiabatique d'un gaz (qui donc s'échauffe)

Les causes d'inflammation peuvent être naturelles (foudre), humaines (imprudence, malveillance) ou technologiques. Les mélanges avec l'air de substances inflammables ou combustibles sont plus ou moins sujets à l'inflammation. On a recours aux grandeurs caractéristiques suivantes (elles sont établies d'après des normes) :

- **Limite inférieure d'explosivité ou LIE** : concentration minimale d'un gaz ou d'une poussière combustible dans l'air pour former un mélange capable d'exploser en présence d'une source d'inflammation spécifiée (méthane : 5% en volume, poussière de blé : 50 g/m³) ; en dessous de la LIE, le mélange est dit "trop pauvre" pour exploser
- **Limite supérieure d'explosivité ou LSE** : concentration maximale d'un gaz dans l'air pour former un mélange capable d'exploser en présence d'une source d'inflammation spécifiée (méthane : 15% en volume) ; au-dessus de la LSE, le mélange est dit "trop riche" pour exploser.

A l'origine d'un accident d'éclatement de réservoir se trouve souvent le défaut dit de « sur-remplissage » d'un liquide ou d'un gaz liquéfié. Une part suffisante du réservoir doit en effet toujours être réservée à la phase gazeuse, pour permettre l'évaporation du liquide lors des variations externes de température et l'augmentation modérée de la pression interne. Le « sur-remplissage » et la diminution consécutive du volume laissé aux gaz peut provoquer l'éclatement du réservoir.

II-6-3-2- Les effets de l'explosion

L'explosion produit essentiellement des effets de surpression et des effets thermiques ainsi que des effets de projection.

Les effets de surpression engendrés par une explosion due à la production de gaz de combustion, sont relativement restreints en champ libre. En fonction du degré de confinement et d'encombrement du lieu où se produit l'explosion, les effets de surpression peuvent devenir importants. Dans les cas de fort confinement, elle peut atteindre une dizaine de bars. La quasi-totalité des explosions de gaz ou de poussières présentent des vitesses de flamme inférieures à 100 mètres par seconde et des surpressions inférieures à 10 bar : ce sont des déflagrations. Dans certaines conditions (notamment dans des conditions de confinement de produits), des transitions de déflagration à détonation sont possibles.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

Les effets d'un éclatement de réservoir sont d'une part des effets de surpression, dus à l'expansion brutale des gaz comprimés et à la vaporisation instantanée d'une partie de la phase liquide, et d'autre part des projections de fragments du réservoir.

Les valeurs seuils réglementaires pour l'évaluation des effets de surpression sur l'homme ou les structures, sont les suivantes :

- 20 mbar correspondant aux effets de bris de vitres
- 50 mbar correspondant aux effets irréversibles et aux dégâts légers sur les structures
- 140 mbar correspondant aux premiers effets létaux et aux dégâts sérieux sur les structures
- 200 mbar correspondant aux effets létaux significatifs et aux dégâts graves sur les structures
- 300 mbar correspondant à des dégâts très graves sur les structures

Les effets thermiques d'une explosion sont dus au rayonnement de la flamme et des gaz chauds de combustion. Leur portée et leur gravité sont variables selon l'étendue de la propagation de l'explosion et selon sa vitesse. Plus une explosion sera confinée ou en milieu encombré, plus la vitesse de flamme et la surpression seront grandes ; les effets thermiques seront alors moins marqués, la flamme "passant trop vite", et les effets de surpression seront nettement prépondérants. Par ailleurs, plus les conditions d'explosivité du mélange seront réunies sur une étendue vaste, plus les cibles distantes seront affectées par les effets cumulatifs du rayonnement.

II-6-2-3-Comment prévenir les explosions ou en limiter les effets :

Il faut veiller à ce que le combustible (gaz ou poussières), le comburant (l'air) et la source d'inflammation ne forment jamais des conditions favorables à une explosion, par exemple :

- en supprimant le comburant en utilisant des toits flottants dans les bacs d'hydrocarbures pour supprimer l'air, ou encore en substituant le comburant par un ciel de gaz neutre pour les liquides hautement inflammables ou les liquides inflammables chauffés,
- en supprimant le combustible par une ventilation suffisante des locaux susceptibles de contenir des gaz inflammables (maintien du mélange gaz-air en dessous de la LIE), complétée par une détection de fuites de gaz ou de liquides inflammables, par une aspiration des poussières

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

combustibles à leur point de production, par des nettoyages réguliers des dépôts de poussières (dans les silos de stockage de céréales),

- en supprimant la source d'inflammation en éloignant ou en supprimant toute source de chaleur, en utilisant des matériels électriques isolés et adaptés aux atmosphères explosibles (ATEX), en établissant des consignes de permis de feu et de permis de travaux.

Il faut également limiter le confinement pour éviter les effets de surpression importants, par exemple en aménageant des surfaces spéciales (évents) s'ouvrant sous l'effet d'une surpression pré-calculée, et évacuant ainsi l'énergie de l'explosion avant qu'elle ne se transmette à d'autres zones à atmosphère explosible.

Dans le cas des explosions de poussières, on cherche enfin à éviter la transmission de l'explosion d'un volume à un autre en pratiquant des séparations résistantes (découplages) entre les volumes. Le souffle d'une explosion étant capable de mettre en suspension d'éventuels dépôts de poussières accumulées sur les surfaces, elle peut en effet trouver dans un volume initialement dénué d'atmosphère explosible de nouvelles conditions propices à l'explosion, avec la possibilité d'un effet de croissance accélérée en chaîne.

II-6-3- Froth-over :

Débordement avec moussage qui résulte de l'ébullition d'eau dans un réservoir réchauffé non en feu et qui consiste en une éjection avec plus ou moins de force d'une certaine quantité d'hydrocarbure. Un exemple typique est soit la rupture d'un serpentin de vapeur de réchauffage soit le remplissage d'un réservoir en produit lourd chaud où l'eau a été mal purgée.

II-6-4-Slop-over :

Débordement par ébullition dû à l'application accidentelle d'eau (pluie, arrosage, mousse) à la surface d'un produit lourd en combustion lorsque la température excède 100 °C. Pour prévenir ce phénomène, il convient de refroidir les parois et/ou de soutirer du produit.

II-6-5- Back-draft (explosion de fumé) :

L'explosion de fumées (EF) est un accident thermique qui peut survenir lors d'un incendie.

L'explosion peut être provoquée de deux manières :

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

- l'inflammation soudaine d'une atmosphère confinée, saturée de gaz imbrûlés et de particules de graphite (suie, effet similaire au coup de poussière), sous l'effet d'un apport d'oxygène extérieur.
- l'inflammation soudaine d'une fumée mélangée à de l'air sous l'effet d'une énergie d'activation (chaleur, étincelle), il peut survenir plusieurs heures après l'extinction.

II-6-6- flash -over :

L'embrassement généralisé éclair (EGE), ou flashover en anglais, est un phénomène thermique, une phase du développement d'un feu dans un local semi-ouvert où l'apport de comburant se fait de moins en moins. En effet, un tel local permet, d'une part une alimentation convenable de l'incendie en oxygène (contrairement à l'explosion de fumées, l'EGE ne se produit pas du fait d'un afflux soudain d'air), d'autre part une accumulation de chaleur.

Brutalement, alors que l'incendie était localisé dans la pièce, celle-ci se met à brûler dans son intégralité. Ce n'est pas le feu qui progresse de proche en proche, mais tous les objets, et même l'atmosphère du local chargée en imbrûlés, qui s'embrasent brusquement.

II-6-7- UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) :

Les explosions accidentelles de gaz à l'air libre, ou UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion), comprennent généralement la succession d'étapes suivantes :

- Rejet dans l'atmosphère d'un produit combustible, le produit étant en phase gaz ou en phase liquide ; les combustibles liquides rejetés peuvent rester en suspension (formation d'aérosols) ou se disperser au sol pour former une flaque qui en s'évaporant conduit à son tour à un rejet diffus de gaz,
- Mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable,
- De manière concomitante, dispersion et advection du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable,
- Inflammation de ce volume,
- Propagation d'un front de flamme au travers de la ou des parties inflammables du nuage; ce front de flamme agit à la manière d'un piston sur les gaz environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne si sa vitesse de propagation est suffisante ou si les gaz sont confinés ;

dans tous les cas, la propagation des flammes s'accompagne d'une expansion des gaz brûlés qui passent par des températures de plusieurs centaines de °C et jusqu'à 2000 °C environ ;

- Enfin, le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

II-6-7- 1-Description des effets :

Les effets générés par un UVCE sont fortement dépendants des conditions locales dans lesquelles l'explosion a lieu : condition du mélange gazeux et conditions de l'environnement.

a)effet thermique : L'expérience montre qu'en pratique, les effets thermiques de l'UVCE ne sont pas dus au rayonnement thermique (très court) du nuage enflammé, mais uniquement au passage du front de flamme. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours de la flamme est susceptible de subir l'effet létal, mais celui-ci n'excède pas la limite extrême atteinte par le front de flamme. Ainsi, l'effet thermique de l'UVCE sur l'homme est dimensionné à partir de la distance à la Limite Inférieure d'Inflammabilité, LII.

De manière générale, l'effet thermique d'un UVCE sur les structures se limite à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures,...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, l'UVCE peut être initiateur d'un incendie.

b)Effets de surpression : Ces effets sont produits par l'effet piston du front de flamme sur le mélange combustible. Plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude de l'onde de pression est importante. Celle-ci se propage dans l'environnement à la façon d'une onde acoustique dont l'amplitude s'atténue lorsque l'on s'éloigne du centre de l'explosion, de manière inversement proportionnelle à la distance.

En l'absence d'obstacles, on observe expérimentalement que la propagation de la flamme dans un mélange homogène et au repos est très faiblement accélérée, et que les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars. En revanche, la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

En présence d'obstacles, leur contournement géométrique et la turbulence induite dans leur sillage sont les principaux mécanismes d'accélération de flamme.

II-6-8- BLEVE (boiling liquid expanding vapour explosion) :

II-6-8-1- Définition :

Le BLEVE est l'un des accidents les plus grave qui peuvent se produire dans les bacs de stockage ou pendant le transport des matières dangereuse.

C'est une vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un équipement contenant un liquide à une température supérieure à sa température d'ébullition a la pression atmosphérique.

La libération soudaine d'un gaz liquéfié sous pression produit une explosion instantanée entraînant une série d'impact :

- Une boule de feu
- Rayonnement thermique
- One de choc
- Projection des débris

II-6-8-2- Description du phénomène :

Les gaz liquéfiés sous pression présentent un risque important en cas de rupture du réservoir qui les contient lorsqu'ils sont soumis à une source de chaleur importante.

Lorsque l'on comprime un gaz, à partir d'une certaine pression, il devient liquide ; cette propriété permet de stocker de grandes quantités de gaz dans des réservoirs : butane, propane, gaz de pétrole liquéfié (GPL)... Il apparaît alors au-dessus du liquide un « ciel gazeux » (la plus grande partie du produit est liquide, une petite partie est gazeuse et occupe le volume restant). En fonctionnement normal, lorsque l'on suture du gaz du réservoir, le liquide bout (à température ambiante) et la vapeur ainsi produite vient compenser le volume retiré.

Réservoir contenant du gaz liquéfié : dans le réservoir, la phase liquide est surmontée d'un ciel gazeux sous pression.

Si le réservoir se rompt (à la suite d'une montée en pression et d'une fragilisation de l'enceinte par un feu), il peut se produire une explosion catastrophique : la pression du ciel gazeux se libère et crée à l'extérieur une onde de surpression aérienne ; la pression baisse brusquement dans le réservoir ; le liquide se met à bouillir violemment dans toute sa masse pour retrouver un équilibre thermodynamique, la quantité de gaz libérée « regonfle » le réservoir (le gaz n'a pas le temps de s'échapper par la fuite) ; le réservoir explose alors littéralement, provoquant une deuxième onde de surpression (bien plus importante que la première) ainsi que la projection d'éclats métalliques ; le gaz libéré se mélange à l'air ; s'il s'agit d'un gaz inflammable, il peut former une véritable boule de feu.

II-6-8-3- Température limite de surchauffe (TLS) :

La définition du phénomène de BLEVE a longtemps fait appel à la notion de Température Limite de Surchauffe (T.L.S.). Lorsqu'on transfère, à pression donnée, de la chaleur à un liquide, celui-ci subit une augmentation de température, jusqu'à atteindre son point d'ébullition et à former des bulles de vapeur qui se développent sur les sites actifs que sont les impuretés et les interfaces avec les solides. Lorsqu'il n'y a pas suffisamment de sites de nucléation dans le liquide, le point d'ébullition peut être dépassé sans qu'il n'y ait d'ébullition. Dans ce cas, le liquide est dit surchauffé. Il existe cependant une limite de température, à une pression donnée, au-delà de laquelle se développent des bulles de vapeur dans tout le liquide, même en l'absence de sites de nucléation (C.C.P.S., 1994). Cette limite est la limite de surchauffe d'un liquide, appelée encore température de nucléation homogène.

Ceci est illustré sur la figure 1 suivante qui donne, à titre d'exemple, la température limite de surchauffe en fonction de la pression d'un gaz liquéfié pur.

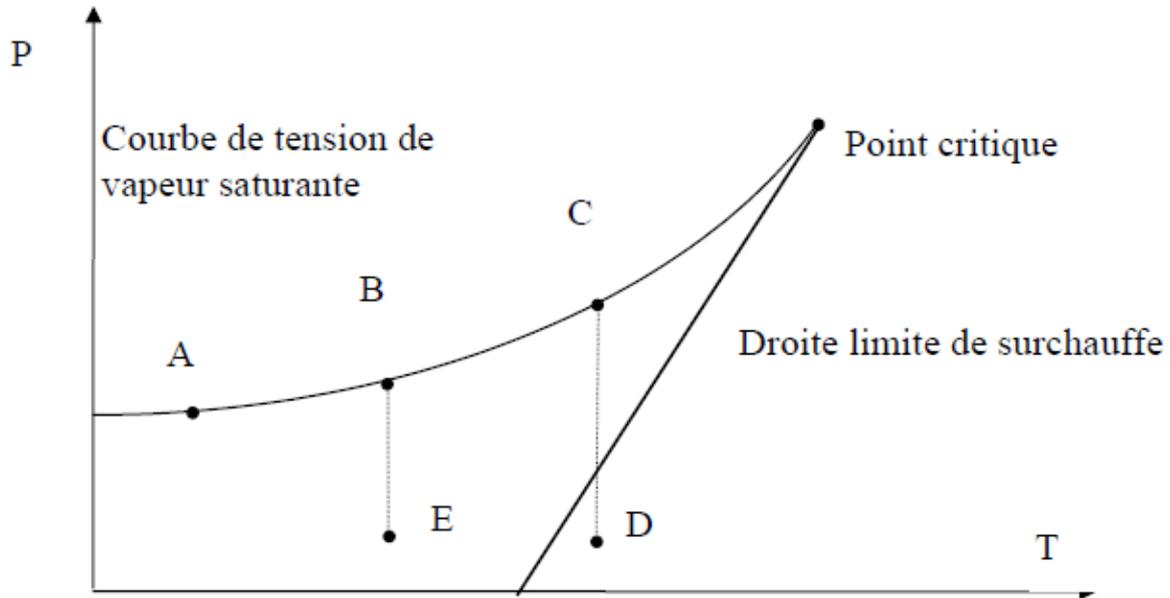


Figure 6 : Température limite de surchauffe en fonction de la pression

Considérons, par exemple, un gaz liquéfié pur à l'équilibre thermodynamique dont l'état est présenté par le point **A** de la figure précédente. Si on lui fournit de la chaleur, le point représentatif de son état se déplace sur la courbe de tension de vapeur saturante jusqu'à rejoindre le point **B**. Le gaz peut alors passer, par dépressurisation brutale, à l'état représenté par le point **E** en restant, au moins momentanément, surchauffé, à l'état liquide avant de se vaporiser plus ou moins rapidement. En revanche, du gaz dont l'état est représenté par le point **C** de la courbe de tension de vapeur, ne peut subir une dépressurisation brutale amenant la droite verticale représentative de cette transformation à couper la droite limite de surchauffe sans subir une vaporisation homogène et rapide, pouvant même avoir un caractère explosif.

On notera que la température limite de surchauffe d'un produit à pression donnée est le point

Vérifiant : $\left(\frac{dp}{dv}\right)_T = 0$ (C.C.P.S., 1994).

Il n'existe toutefois pas d'équation d'état avérée décrivant le comportement d'un liquide surchauffé.

On pourra retenir, de façon suffisante pour la pratique, la formule de Reid établie à partir de l'équation d'état de **Redlich-Kwung**, qui donne la température limite de surchauffe à la pression atmosphérique en fonction de la température critique du produit :

TLS = 0,895.Tc (K)

L'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) note ici, à titre d'exemple, que dans le cas du propane, cette formule conduit à calculer une T.L.S. de 58°C contre 53°C généralement reconnu pour ce produit, soit une erreur d'environ 10% dans ce cas (pour des valeurs de TLS relatives à d'autres produits, le lecteur pourra encore se reporter à (Faucher et al., 1991)).

II-6-8-4- Comparaison entre BLEVE chaud et froid :

II-6-8-4-1- Développement de bleve chaud :

Johnson et Pritchard ont effectué, en 1991, sept essais de BLEVE de réservoirs remplis d'une ou de deux tonnes de G.P.L. (**Shield, 1995a ; Johnson et Pritchard, 1991**) Six expériences ont été réalisées à partir de butane, pour différents niveaux de remplissage et de pression. Dans quatre de ces six essais, le produit rejeté a été enflammé et a donné matière à une boule de feu. Une septième expérience, avec du propane, a également donné matière à l'apparition d'une boule de feu. Suite à l'observation des résultats de Johnson et Pritchard, (**Shield, 1995a**) distingue cinq étapes du développement d'un BLEVE.

Etape 1 : Le réservoir se rompt, des fragments sont éjectés et une onde de surpression est engendrée par la détente de la phase gazeuse. Cette onde est suivie d'une onde de dépression

Etape 2 : Un nuage de gouttelettes, qui se vaporisent adiabatiquement alors que la pression dans le nuage diminue, est éjecté. La quantité de vapeur produite à partir des gouttelettes est largement supérieure à la quantité de vapeur libérée à l'étape 1 précédente.

Au cours de cette étape, il y a peu de mélange avec l'air ambiant alors que le nuage s'étend. La vaporisation continue jusqu'à ce que la pression du nuage soit égale à la pression ambiante, le volume du nuage étant alors égal au volume de vapeur flashée à la pression ambiante et à la température de saturation correspondante (plus une légère correction du fait de la présence de gouttelettes).

Si la vitesse radiale d'expansion du nuage excède la vitesse locale du son dans la zone de dépression suivant l'onde de surpression engendrée par l'expansion de la phase vapeur (étape 1), une onde de choc due à l'évaporation instantanée du liquide peut se former et engendrer un état turbulent au sein du nuage. Cette seconde onde de choc n'est observée que lors d'expérimentations pour lesquelles le niveau de remplissage est assez

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

important. Pour des taux de remplissage trop faibles, l'onde de dépression suivant l'onde de surpression revient plus lentement à la pression ambiante et il est probable, dans ce cas de figure, que l'onde de choc formée par la vaporisation instantanée du liquide soit d'une magnitude moindre que l'onde de dépression. Néanmoins, même dans ce dernier cas, le nuage formé est turbulent.

Etape 3 : Les deux ondes de surpression successives ont quitté le nuage. Ce dernier continue à s'étendre du fait de sa quantité de mouvement radial, mais à une vitesse qui diminue alors que le mélange turbulent entraîne de plus en plus d'air.

Etape 4 : L'inflammation se produit à proximité du centre du nuage et une boule de feu se développe. L'expansion de la boule de feu s'arrête lorsque tout le nuage est enflammé. C'est alors que la boule de feu est la plus brillante.

Puisque le nuage contient de l'air, **Shield** suppose que durant cette étape seule la vapeur est consommée et que les gouttelettes n'ont pas le temps d'être vaporisées. L'expansion du nuage en boule de feu engendre une onde de surpression suivie d'une onde de dépression due à l'arrêt brutal de cette expansion.

La vitesse d'expansion de la boule de feu est égale à la vitesse de propagation de la flamme dans le nuage turbulent.

Lorsque la vitesse d'expansion radiale du nuage est du même ordre que la vitesse aléatoire des tourbillons turbulents, l'expansion du nuage n'est plus alors due qu'aux effets de turbulence.

Bien évidemment, dans la réalité, le nuage de vapeur peut s'enflammer durant chacune des quatre étapes précédentes, mais, puisque de l'air doit être mélangé au nuage, il est probable que la combustion se produise principalement dans la périphérie du nuage et les mécanismes d'expansion sont ainsi similaires, même si certaines étapes peuvent se chevaucher.

Etape 5 : La boule de feu hémisphérique s'élève pour prendre la forme d'une sphère. Sa combustion continue mais la boule de feu ne s'étend plus, indiquant ainsi que l'air requis pour la combustion est déjà mélangé au nuage. Le combustible est alors pourvu par les gouttelettes liquides. La boule de feu s'élève alors approximativement à vitesse et volume constant, pour prendre la forme caractéristique d'un champignon.

Ensuite, du fait de l'apparition de poches de produits de combustion, l'aire de la flamme visible diminue. Le flux thermique rayonné décroît alors sans cesse.

Lorsque la combustion est presque complète, la fumée constituée des produits de combustion s'élève et se dissipe.

II-6-8-4-2- BLEVE froid :

SHIELD note, d'après des modélisations, que lors de BLEVE dits "froids", la moindre surchauffe du liquide a deux principaux effets :

- il n'y a pas assez d'air entraîné pour permettre la combustion complète de toutes les gouttelettes d'aérosol formées,
- des gouttelettes non brûlées sont susceptibles de retomber au sol et d'engendrer ainsi un feu de flaque.

Pour le BLEVE, l'INERIS propose in fine de retenir la définition suivante :

"Un BLEVE correspond à la ruine complète d'un réservoir pressurisé contenant un liquide dont la température est très supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique".

Les BLEVE ont une cause commune, une perte de confinement amenant à la dépressurisation du contenu du réservoir. Cette perte de confinement peut être notamment due:

- à l'impact d'un projectile,
- à l'exposition du réservoir à un incendie,
- à la fatigue du réservoir,
- à de la corrosion,
- à une construction ou des équipements défectueux.

L'analyse a mis en évidence que l'on peut distinguer deux types de BLEVE, les BLEVE dits "froids" et "chauds".

Un BLEVE "

froid serait dû à une faiblesse mécanique du réservoir. Les effets de pression sont ainsi relativement réduits, mais le lourd nuage formé au niveau du sol, peut, s'il est inflammable et s'il trouve un point d'inflammation, conduire à un incendie conséquent (apparition d'une boule de feu au sol et d'un feu de flaque).

Pour qu'un réservoir donne matière à un BLEVE chaud il faut que la température moyenne du produit qu'il contient soit supérieure à la température limite de surchauffe du produit à la pression atmosphérique (c'est à dire supérieure à la température pour laquelle, à la pression atmosphérique, le liquide ne peut pas rester en état de surchauffe).

On notera que plus la surchauffe d'un liquide est importante, plus son ébullition, en cas de dépressurisation rapide, est violente.

II-7-Effets des accidents

Les accidents liés aux gaz combustibles liquéfiés et liquides inflammables de 1ère catégorie étant des incendies et des explosions, les effets seront de deux ordres : effets thermiques et effets de pression.

II-7-1- Effets thermiques :

Lors d'une combustion, la flamme émet des rayonnements analogues à ceux du soleil, également appelés "flux thermique", d'intensité variable, qui chauffent toute surface exposée. Cet échauffement peut conduire à des brûlures graves sur l'homme.

La réglementation retient 2 seuils :

- Seuil léthal (risque de décès pour 1 % de la population) : 5 kW/m^2 ;
- Seuil I des blessures irréversibles : 3 kW/m^2 .

Ces seuils ont été évalués pour des personnes normalement habillées exposées au rayonnement pendant 3 minutes. Ils ne correspondent pas à la notion de brûlures au 1er, 2ème ou 3ème degré, basée sur la profondeur de la destruction de l'épiderme.

Il est à noter que des flux thermiques de 8 à 12 kW/m^2 sont susceptibles de détruire des structures métalliques et d'enflammer spontanément des matières combustibles (bois, plastiques, ...).

Par comparaison, le rayonnement solaire maximal reçu sur Terre est de l'ordre de 1 kW/m^2 . Les hydrocarbures enflammés émettent un rayonnement au contact de l'ordre de 30 à 50 kW/m^2 .

II-7-2- Effets de pression :

Les explosions sont caractérisées par une ou plusieurs ondes de pression qui viennent endommager des structures, projeter des débris et, éventuellement, causer directement des lésions sur les êtres humains, voire la mort.

Les ondes de pression peuvent être créées de 2 manières :

- Combustion d'une grande quantité de gaz sur un faible laps de temps : Les gaz brûlés occupent en effet un volume environ 10 fois plus important que les gaz frais, d'où la création d'une onde de pression.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

- Vaporisation rapide d'une grande quantité de gaz liquéfié : Un gaz occupe un volume environ 500 à 1000 fois plus important qu'un liquide. Les gaz liquéfiés sont généralement maintenus sous pression ; en cas de perte brutale de la pression (éclatement du réservoir par exemple), une grande partie du liquide redevient gaz et veut reprendre son volume initial, d'où la création d'une onde de pression.

La réglementation retient 2 seuils :

- Seuil léthal (risque de décès pour 1 % de la population) : 140 mbar ;
- Seuil des blessures irréversibles : 50 mbar.

Ces seuils ne sont pas liés aux dégâts directs sur l'homme mais aux dégâts sur les structures, qui ont un impact sur l'homme (chute d'éléments lourds, projection de débris,...). Ainsi, quelques vitres se brisent entre 10 et 20 mbar, les structures légères sont endommagées à partir de 50 mbar, et les structures lourdes à partir de 140 mbar. On considère qu'à partir de 300 mbar, toute installation non spécifiquement conçue est détruite.

Par comparaison, les êtres humains sont "seulement" renversés par une onde de pression de l'ordre de 50 mbar, les premières atteintes au tympan sont observées à partir de 200 mbar et les atteintes graves (éclatement des organes creux comme les tympans ou l'estomac) sont constatés aux alentours de 1000 mbar. Au-delà, on parle de personnes ayant subi un effet de « blast ». Ceci s'explique par le fait que les êtres vivants (animaux et végétaux) sont «mous», ce qui leur permet d'absorber l'onde de pression, de se déformer sans conséquence grave.

Il est à noter que dans tout phénomène impliquant des effets de pression, on assiste à la projection de débris. Cet effet «missile» est cependant difficilement prédictible, tant en ce qui concerne la masse des projectiles que leur trajectoire.

Chapitre 2 : les risques et phénomènes liés au stockage

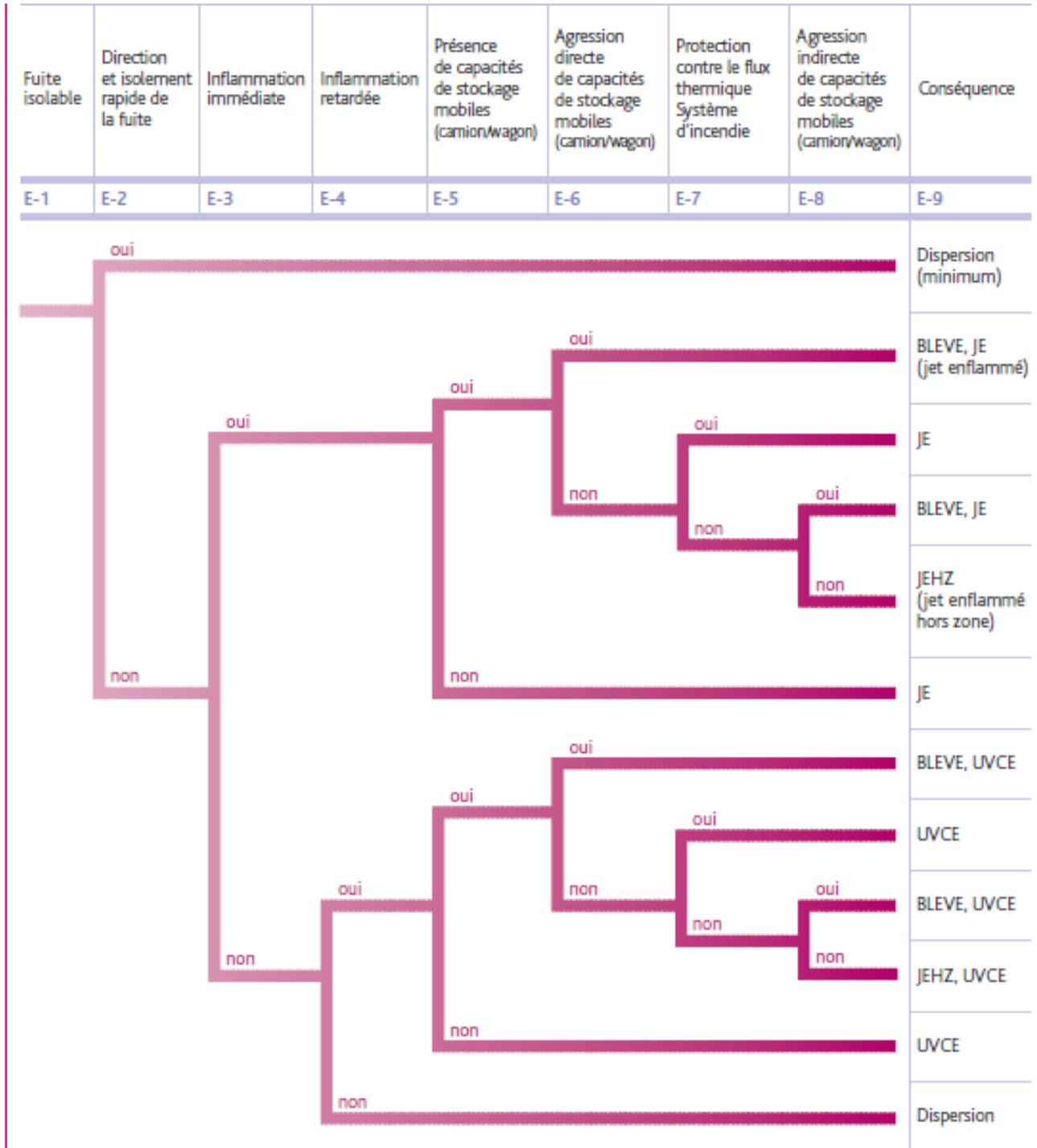


Figure 7 : Arbre d'évènements pour une fuite isolable agressant des capacités de stockage mobiles.

III-1-Introduction :

Tous les produits inflammables caractérisés par une viscosité importante et une certaine plage d'ébullition étaient considérés comme susceptibles de donner lieu à un boilover. On distingue deux types de boilover :

- Boilover classique.
- Boilover en couche mince.

L'objet de ce chapitre est de s'intéresser aux différentes étapes et les caractéristiques pour les deux types de boilover

III-2-Definition générale du phénomène :

Le Boilover est un phénomène explosif lié aux incendies d'hydrocarbures. En présence d'un réservoir d'hydrocarbures en flamme, La chaleur de l'incendie est communiquée à l'eau située au fond des réservoirs qui peut se vaporiser brusquement en projetant des gouttelettes d'hydrocarbure enflammées dans l'air sous la forme d'une boule de feu.

Les conditions initiales vont dépendre de la réponse du produit au flux thermique émis par la flamme située au-dessus du bac. En effet, pour les deux phénomènes dangereux que sont le boilover classique et le boilover en couche mince, il est nécessaire d'avoir un bac en feu et également la présence d'eau en fond de bac. C'est le même mécanisme qui conduit à la mise en suspension du liquide inflammable, à savoir la vaporisation brutale de l'eau.

Concernant la réponse du liquide au feu de bac :

- le liquide inflammable doit être plus léger que l'eau ;
- le liquide inflammable doit être plus visqueux que l'essence pour permettre d'observer un effet piston ;
- un liquide pur, ne comportant qu'un seul produit c'est-à-dire se caractérisant par une seule valeur de température d'ébullition, ne peut pas être le siège d'un boilover classique en revanche, il peut donner lieu à un boilover en couche mince ;
- un produit miscible avec l'eau ne peut donner lieu ni à un boilover classique, ni à un boilover en couche mince.

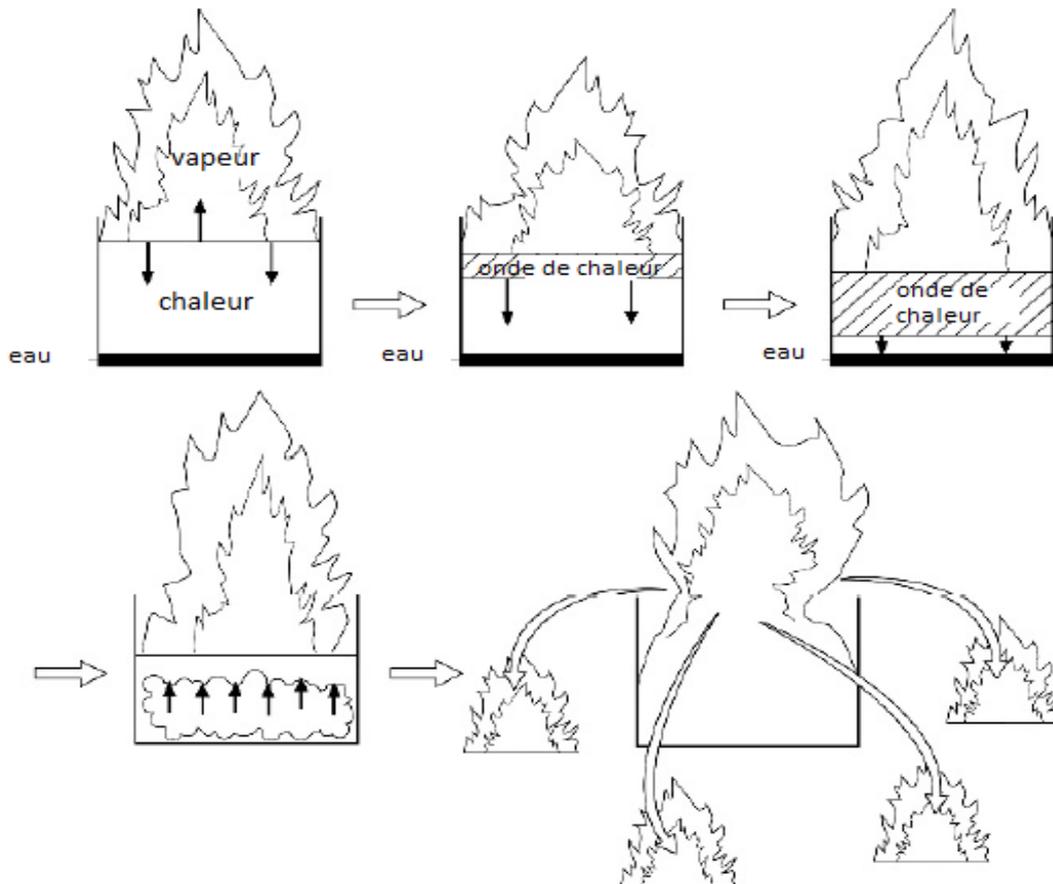


Figure 1 : boilover dans un réservoir des hydrocarbures

III-3-Mécanisme du boilover :

dans un réservoir pendant la combustion d'un hydrocarbure contenant un mélange de plusieurs composants, le rayonnement de flux thermique de la surface de l'hydrocarbure évapore les composants les plus légers et forme une couche dense et isotherme qui s'appelle < la couche chaude > , Si la vitesse de croissance de la couche chaude est supérieure à la vitesse de régression de la surface du combustible, la couche chaude se propage vers le fond du réservoir, Si le réservoir contient une couche d'eau, dès que la couche chaude atteint l'eau, elle provoque l'évaporation initiale d'une partie de l'eau. En raison des turbulences générées par l'évaporation, les deux couches se mélangent, provoquant une vaporisation importante de l'eau. La génération instantanée d'une grande quantité de vapeur dont le volume spécifique est 1600 fois supérieur à celui de l'eau liquide provoquera une violente éruption, éjectant le combustible enflammé hors du réservoir. et augmente la taille des flammes et augmentant considérablement la taille des flammes, La

Chapitre 3 : phénomène du boilover

température d'ébullition de la couche d'eau sera supérieure à 100 °C en raison de la pression hydrostatique. Pour un réservoir haut, cette température peut atteindre 120 °C.

Dans un boilover, la couche supérieure du combustible peut atteindre des températures allant jusqu'à 430 K. La vitesse à laquelle l'onde de chaleur progresse est généralement comprise entre 0,3 m/h et 1 m/h.

La vitesse de progression de l'onde de chaleur est généralement comprise entre 0,3 m/h et 1 m/h. Dans certains cas, elle a atteint des valeurs de 1,2 m/h.

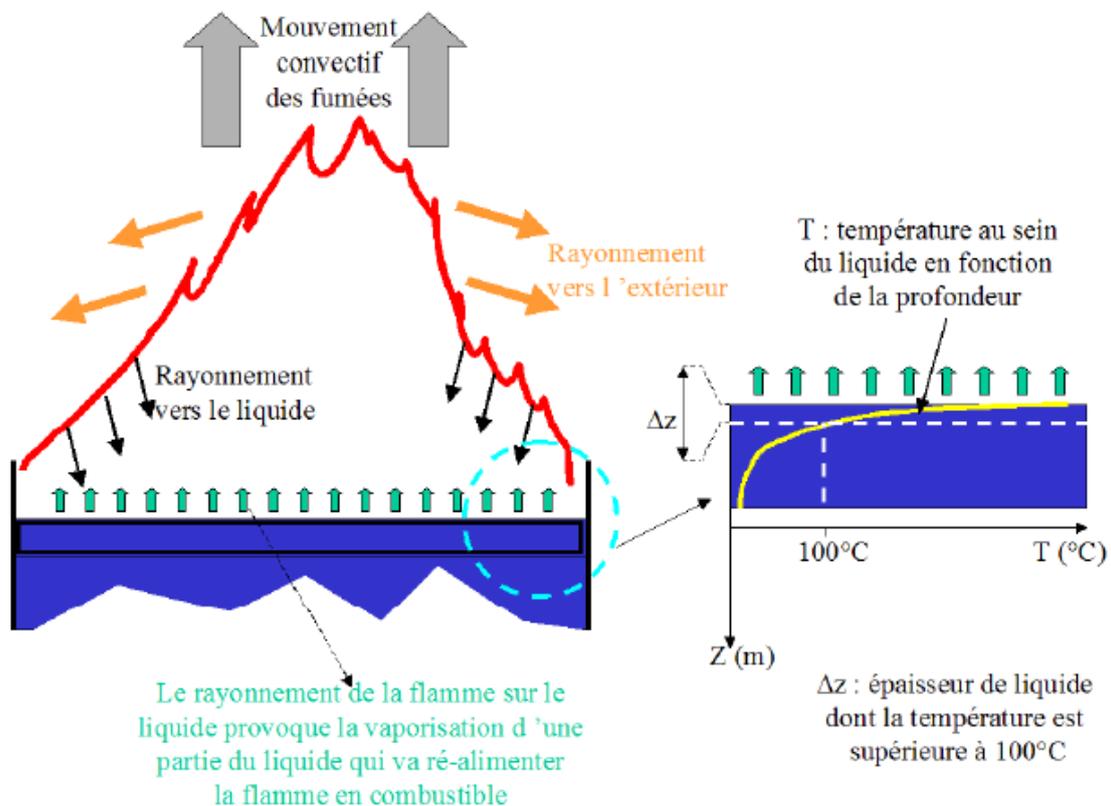


Figure 2 : principe de combustion d'un liquide inflammable

III-4-CONDITIONS NECESSAIRES POUR ENGENDRER UN BOILOVER

Pour qu'un boil-over se produise, 4 conditions doivent être réunies :

- le feu du bac ;
- la présence d'eau à transformer en vapeur ;
- la création d'une onde de chaleur qui entre en contact avec le fond d'eau situé sous la masse d'hydrocarbures ;

- un hydrocarbure suffisamment visqueux que la vapeur ne puisse pas traverser facilement depuis le bas.

III -4-1 La présence le d'eau :

La présence d'eau à l'intérieur d'un réservoir peut s'expliquer par:

- l'hydrocarbure contient naturellement une fraction réduite d'eau susceptible de migrer par densité au fond du bac (décantation) .
- pénétration d'eau de pluie au travers des événements.
- condensation de l'humidité de l'air due à la respiration du réservoir et des cycles jour/nuit .
- introduction d'eau de refroidissement ou d'extinction en cas de feu.

III -4-2 Onde de chaleur :

Dans le cas de combustion d'un hydrocarbure caractérisé par une large plage de températures d'ébullition, les coupes légères à bas point d'ébullition montent à la surface et alimentent le feu, tandis que les coupes plus lourdes à haut point d'ébullition, coulent vers le fond et forment un front chaud qui réchauffe les couches d'hydrocarbure froid de plus en plus profondes, tandis que le feu continue de brûler en surface. On obtient ainsi, sous la surface du feu, une zone de température homogène dont l'épaisseur va croissant au cours du temps

Plusieurs explications sont possibles. L'explication de Broeckmann (1992 et Figure 3) est la suivante :

« Durant la période de formation de cette zone, se vaporisent préférentiellement à la surface les composants les plus volatils, raison pour laquelle, à cet endroit, la température qui correspond à la température du combustible s'élève. Il s'ensuit alors que le combustible des couches plus profondes subit un échauffement accru qui a pour conséquence que sa température d'ébullition, à l'intérieur du combustible qui possède encore sa composition d'origine, est dépassée. D'où un début de vaporisation de bulles dans le cœur de la combustion. Du fait de la convection déclenchée, le combustible est homogénéisé ; il se forme une zone de température homogène. »

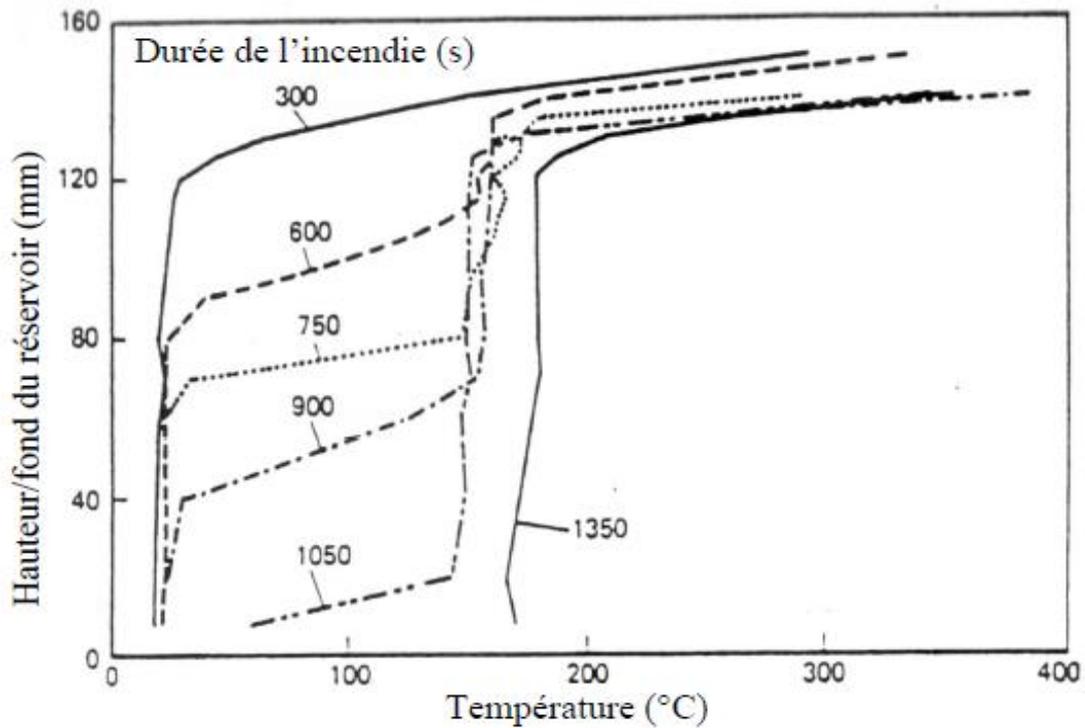


Figure 3 : évolution de la température en fonction de la hauteur de réservoir pour une huile (Broeckman , 1992) .

L'onde de chaleur n'est pas un phénomène de conduction en provenance de la surface en feu : il s'agit d'un transfert de chaleur d'une particule chaude de masse spécifique plus élevée vers une couche plus froide située plus bas.

L'onde de chaleur est alimentée en continu par les résidus de la combustion de surface et son épaisseur augmente plus rapidement que ne diminue la hauteur d'hydrocarbure dans le bac. La température de l'onde de chaleur est une fonction de la nature de l'hydrocarbure en feu et de la durée du feu.

Ceci permet d'écrire les conditions nécessaires à la formation d'une onde de chaleur :

- Naissance d'un feu du bac concerné, ceci implique que le toit est déjà détruit ou expulsé.
- Combustion d'un hydrocarbure à plage d'ébullition suffisamment large.

Chapitre 3 : phénomène du boilover

- Développement d'une vitesse de descente de l'onde de chaleur supérieure au taux de régression du foyer.

Pour qu'il y ait formation d'une onde de chaleur, il faut que la plage d'ébullition soit suffisante, c'est-à-dire qu'elle corresponde à un hydrocarbure composé de suffisamment de corps « purs » différents. Selon les expériences menées par Broeckmann (1992), la plage d'ébullition devrait s'étendre sur 60 °C au-delà de la température d'ébullition de l'eau à la pression d'interface hydrocarbure/fond d'eau telle que :

$$P_i = P_a + \rho_l(TSER) g h$$

Ou :

P_i : pression d'interface hydrocarbure / fond d'eau **pa**

P_a : pression atmosphérique **pa**

$\rho_l(TSER)$: masse volumique du liquide a température de stockage **kg/m³**

g : accélération due à la gravité **m/S**

h : hauteur de combustible dans de réservoir **m**

Nous assimilons la plage d'ébullition d'un hydrocarbure à son intervalle de distillation ASTM.

Par définition :

- Le point initial d'ébullition TIN est la température à laquelle les hydrocarbures les plus légers du produit quittent la masse du produit sous forme de vapeurs, à l'air libre et sous pression atmosphérique au niveau de la mer.
- Le point final d'ébullition TFIN est la température à laquelle les hydrocarbures les plus lourds du produit vaporisent. Cette dernière température est souvent supérieure à la température d'auto-inflammation du produit.

La plage d'ébullition est donc l'intervalle de températures de la plus basse jusqu'à la plus élevée durant lequel toutes les fractions liquides de masse spécifique et de point d'ébullition différents, passeront à l'état vapeur.

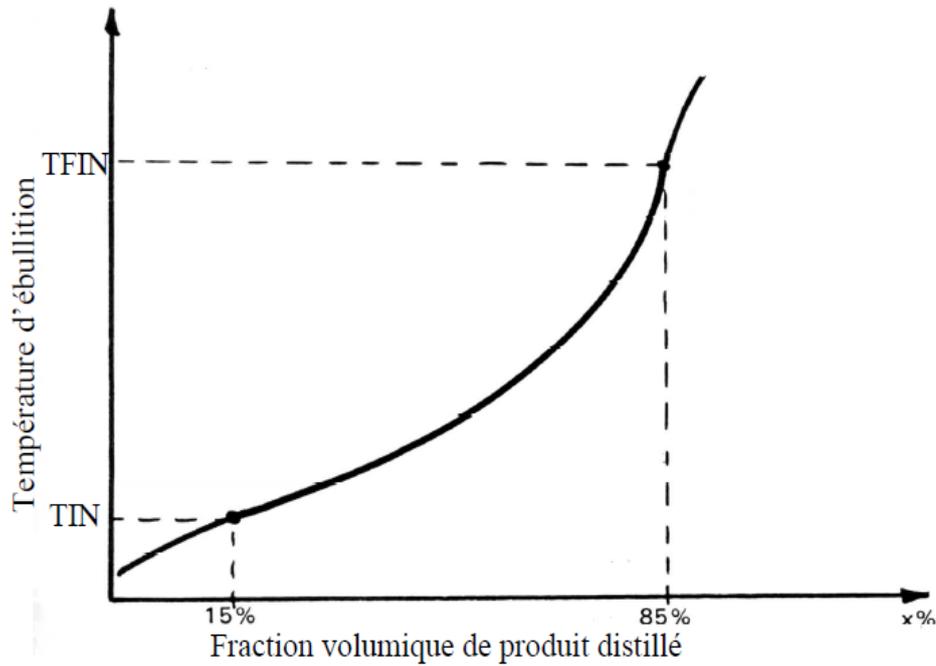


Figure 4 : Evolution de la température d'ébullition d'un produit composé de plusieurs éléments purs en fonction de la fraction volumique de produit distillé.

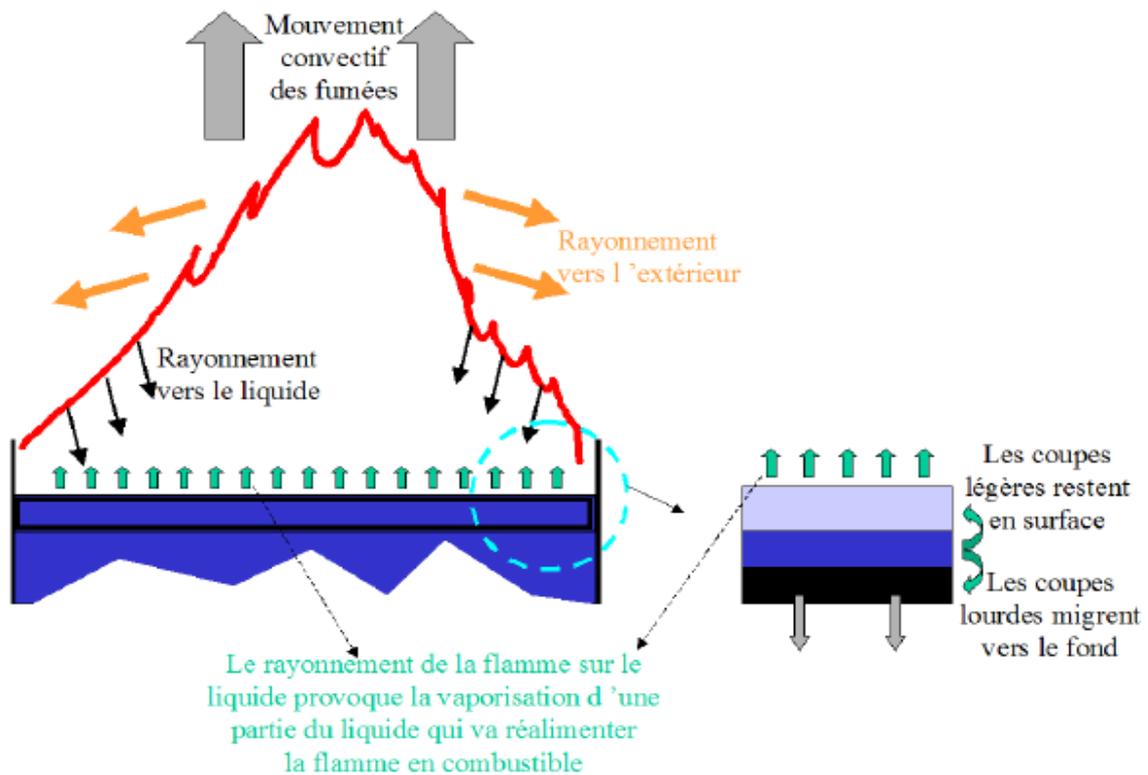


Figure 5 : Principe de formation de l'onde de chaleur (boilover classique)

III -4-3 Hydrocarbure suffisamment visqueux :

Une fois le volume de vapeur engendré au contact de la zone chaude et d'eau en pied de bac, il ne pourra agir à l'instar d'un piston que si l'interface vapeur en expansion/couche d'hydrocarbure liquide offre des conditions d'étanchéité suffisantes. Sinon, la vapeur d'eau engendrée s'échapperait sous forme de bulles au travers de l'hydrocarbure liquide.

Cette condition d'étanchéité se traduit physiquement par une viscosité de l'hydrocarbure stocké.

Pour que l'effet piston se développe, l'aspect étanchéité doit être vérifié à l'interface cavité vapeur d'eau/hydrocarbure liquide. Cela se traduit par un critère sur la viscosité cinématique de l'hydrocarbure à la température de 393 K.

De l'expérience des accidents qui se sont produits, on considère que la limite à retenir quant à la viscosité correspond à celle du kérosène.

On considère qu'un hydrocarbure dont la viscosité cinématique est inférieure à celle du kérosène à 393°K (120°C) n'est pas susceptible de donner matière à un boilover.

Le critère s'écrit donc : $HC > 0,73 \text{ cSt}$, avec HC , viscosité cinématique de l'hydrocarbure impliqué à 393 K exprimée en cSt.

III -5-Facteur de propension au boilover :

Dans la mesure où interviennent :

- la température d'ébullition moyenne,
- la plage de distillation,
- la viscosité cinématique.

Il est dès lors possible de développer de façon semi-empirique un facteur de propension au boil-over PBO fonction de :

- TBUL température d'ébullition de l'hydrocarbure (K),
- $\Delta T_{\text{ébul}}$ sa plage d'ébullition au-delà de 393 K (K),
- V_{HC} sa viscosité cinématique à 393 K (cSt).

Le facteur s'écrit :

$$\text{PBO} = \left[\left(1 - \frac{393}{TBUL} \right) \left(\frac{\Delta T_{\text{ébul}}}{60} \right) \left(\frac{v_{\text{HC}}}{0.73} \right) \right]^{\frac{1}{3}}$$

Chapitre 3 : phénomène du boilover

On notera :

- que le facteur relatif à la plage d'ébullition est au carré puisque, sans zone chaude, il ne peut y avoir de boilover.

On conviendra :

- que si PBO est supérieur ou égal à 0,6, le phénomène de boilover est à considérer à coup sûr,
- que si PBO est nettement inférieur à 0,6, il n'y a aucune raison de considérer qu'un boilover puisse se produire,
- que lorsque PBO est inférieur à 0,6, mais assez voisin de cette dernière valeur, il convient par prudence de calculer les effets d'un boilover.

produit	Tbul _{HC} (K)	Plage d'ébullition	$\Delta T_{\text{boil}} > 393$ K	v_{HC} (Cst)	PBO	Boilover
Brut lourd	621	368-1047	654	5,2	6,76	OUI
Brut moyen	556	348-888	495	2,8	4,24	OUI
Fuel oil N.2	544	453-653	200	10	3,48	OUI
Fuel oil N.1	539	450-647	197	7	3,03	OUI
Gazole	506	473-633	160	0,81	1,2	OUI
kérosène	441	408-478	70	0,73	0,53	NON
naphta	437	418-458	40	0,41	0,29	NON
TR4	395	323-473	80	0,73	0,355	NON
Essence	405,5	363-453	60	0,37	-0,250	NON

Tableau 1 : propension au boilover en cas de feu du bac

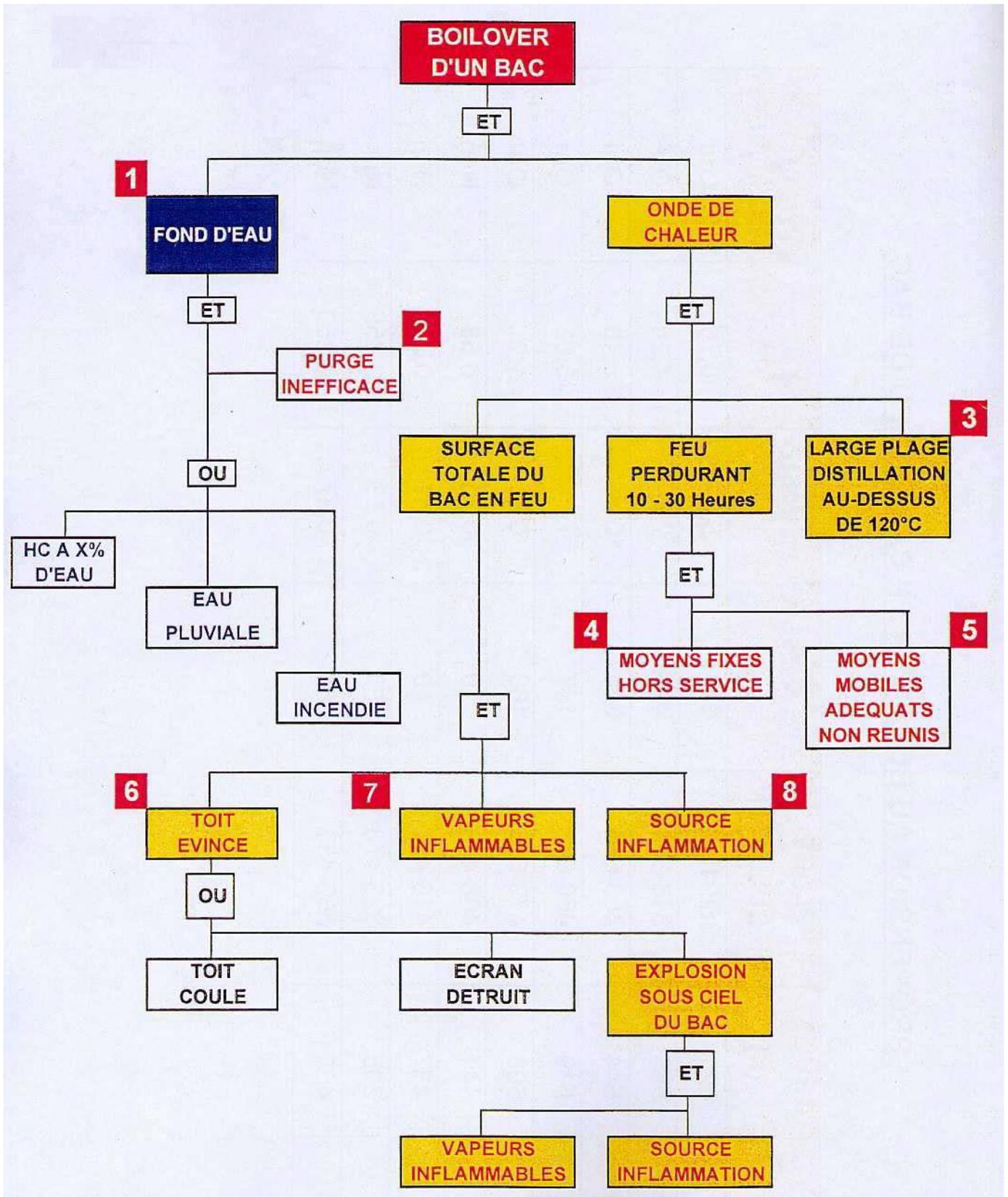


Figure 6 : l'arbre des causes du phénomène boilover

III-6-Les types du phénomène boilover :

III-6-1-boilover classique :

Le **NFPA** (National Fire Protection Association - USA) propose une définition précise du phénomène :

« Le terme de **boilover** est attribué à un événement survenant lors d'un incendie de certains hydrocarbures contenus dans un réservoir à ciel ouvert, lorsqu'une soudaine augmentation de l'intensité du feu [de réservoir] est observée, accompagnée de l'expulsion de l'hydrocarbure hors du réservoir, après une longue période de combustion régulière [de l'hydrocarbure]. Le boilover a lieu lorsque les résidus de combustion, issus de la surface en feu, deviennent plus denses que les hydrocarbures non brûlés et sombrent formant une couche chaude qui progresse vers le fond plus rapidement que la régression de la surface de liquide. Lorsque cette couche chaude, également appelée onde de chaleur, atteint l'eau ou une émulsion d'eau dans l'hydrocarbure située en fond de bac, l'eau est d'abord surchauffée, puis portée à ébullition de façon quasi explosive entraînant le débordement du bac. »

L'INERIS donne une autre définition s'intéressant notamment aux conséquences du phénomène.

«Un **boilover** est un phénomène de moussage brutal impliquant des réservoirs atmosphériques et résultant de la transformation en vapeur, d'eau liquide (fond d'eau, eau libre, émulsion) contenue dans un réservoir en feu. Ce phénomène est à l'origine de violentes projections de combustible, du bouillonnement du contenu du bac, de l'extension des flammes et de la formation d'une boule de feu.

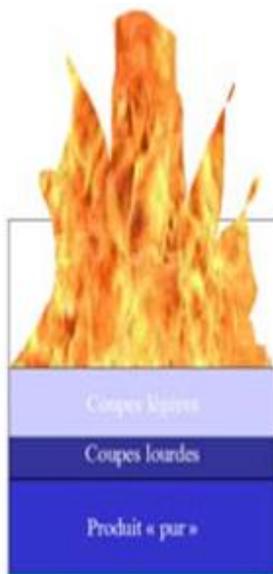
III-6-1-1-Les différentes phases d'un boilover classique :

Phase 1 :



En début d'incendie du bac, le produit occupe tout le volume du bac avec une **composition quasi – homogène**.

Phase 2 :



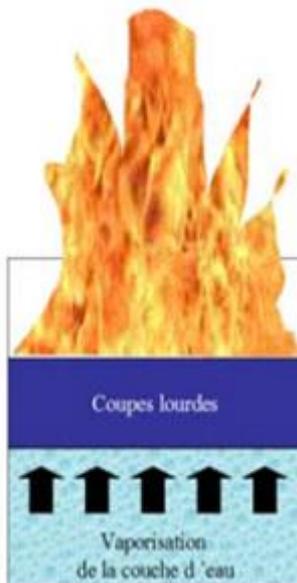
En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une distillation qui conduit à la séparation des coupes légères des coupes plus lourdes. Ces dernières descendant progressivement vers le fond du bac sous l'effet de la pesanteur, c'est la formation d'une **onde de chaleur**

Phase 3 :



Ce phénomène perdure jusqu'à ce que les coupes les plus grandes (onde de chaleur) atteignent l'eau situé au fond du bac. Cette onde de chaleur a une température de l'ordre de 200 C°.

Phase 4 :



Le contact entre l'onde de chaleur et l'eau provoque la vaporisation de cette dernière. Cette **vaporisation brutale** conduit à une augmentation importante de volume et joue le rôle de **piston** en mettant en suspension le liquide inflammable restant dans le bac.

Phase 5 :



Une partie du liquide **déborde** du bac et une autre est **mise en suspension** en se fragmentant en gouttes et en se vaporisant en traversant les flammes pour former une **boule de feu** lors sa combustion.

Figure 7 : différentes phases d'un boilover classique

III-6-1-2- Les conditions d'occurrence du phénomène de boilover classique :

- un feu de bac (condition 1) après l'effacement du toit
- la présence d'eau à transformer en vapeur (condition 2)
- un hydrocarbure pouvant générer une onde de chaleur qui entre en contact avec le fond d'eau et suffisamment visqueux pour s'opposer au passage de la vapeur d'eau vers la surface (condition 3)

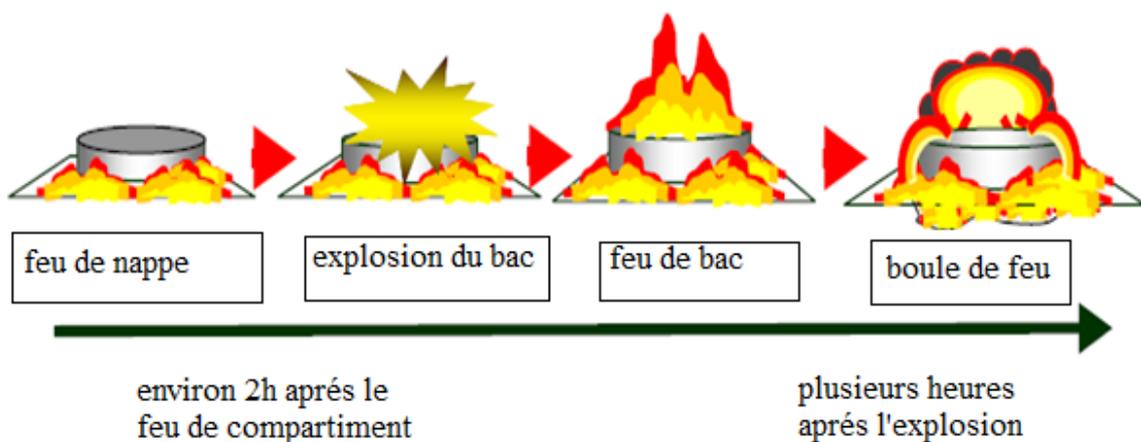


Figure 8 : séquence accidentelle théorique

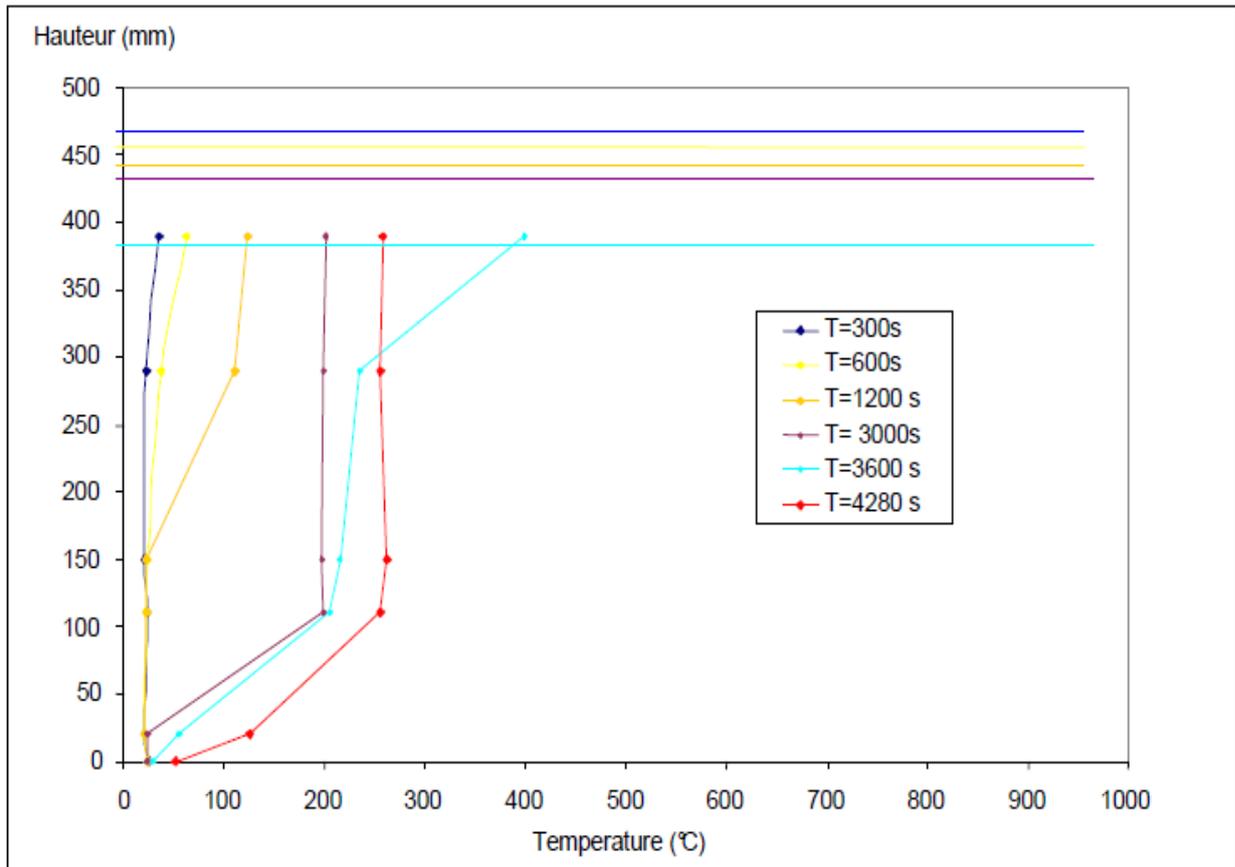


Figure 9 : Évolution de la température à l'intérieur du bac au cours de la combustion de brut

III-6-1-3- Phénomènes à quantifier dans un boilover classique :

Les phénomènes induits par un boilover sont donc les suivants :

- Développement d'un volume de vapeur par effet piston
- Formation d'une boule de feu
- Débordement et épandage d'hydrocarbures en feu à l'extérieur de la cuvette de rétention.

Pour quantifier ces effets, il faut connaître les données suivantes relatives aux hydrocarbures :

Chapitre 3 : phénomène du boilover

Paramètre à connaître	Fuel oil N°2	Brut léger	Brut lourd
Température d'ébullition (k)	544	535	621
Température d'ébullition initiale correspondant à une fraction vaporisée de 15% (k)	453	348	368
Température d'ébullition finale correspondant à une fraction vaporisée de 85% (k)	653	823	1047
Température critique (k)	929,8	686	810
Pression critique (pa)	$1,53.10^6$	$1,86.10^6$	$1,525.10^6$
Masse volumique de la phase liquide à 288k (kg/m ³)	990	802	905
Masse volumique de la phase gaz à 300k (kg/m ³)	11,65	6,686	9,7
Chaleur latente de vaporisation à température d'ébullition (J/kg)	$8,6.10^5$	$2,92.10^5$	$3,384.10^5$
Chaleur de combustion (J/kg)	$4,01.10^7$	$4,33.10^7$	$4,184. 10^7$
Limite supérieure d'inflammabilité (% volume)	0,055	0,055	0,055
Viscosité à 393 k (cst)	10	2	5,2

Tableau 2 : propriétés de produits susceptibles de donner lieu à un boilover.

- **L'effet piston :**

Effet piston Sous la pression de l'interface, la masse volumique de la vapeur est 1700 à 2000 fois moindre que celle de l'eau liquide aux conditions normales de température et de pression. De ce fait, pour que le volume de vapeur engendré remplisse le bac, il suffit que l'épaisseur du fond d'eau soit, en ordre de grandeur, de l'ordre du 1/1700ème au 1/2000ème de la hauteur du bac, soit de l'ordre du centimètre pour les bacs les plus communs. Le volume de vapeur développée quasi instantanément va agir sur la masse d'hydrocarbures la surplombant à l'instar d'un piston. En conséquence, l'accroissement de volume ΔV consécutif à la vaporisation de l'eau contribue à mettre en mouvement la masse d'hydrocarbures en lui communiquant instantanément l'énergie cinétique $PVAP \cdot \Delta V$ où $PVAP$ est la pression de vapeur à l'interface eau/hydrocarbure au moment où l'eau atteint la zone chaude.

III-6-1-4-Conséquences de l'effet piston :

boule de feu, débordement et épandage d'hydrocarbures en feu à l'extérieur du bac A l'issue de cet effet piston, l'hydrocarbure ainsi propulsé va donner lieu d'une part à une boule de feu se développant au-dessus du bac et d'autre part, à un feu de nappe aux alentours du bac en raison de jets liquides retombés au sol. En effet, les fluides éjectés consécutivement à l'effet piston peuvent être animés d'une énergie cinétique importante et retomber au sol avant que leur combustion ne soit terminée. Il est à noter qu'en général, le phénomène de boule de feu apparaît être l'événement (ou phénomène) le plus dangereux pour les personnes (à longue distance) engendré par le boilover.

III-6-2-Boilover en couche mince :

III-6-2-1-Introduction :

la combustion de certains carburants (gazoles, kérosènes, fuel domestique...) ne s'accompagne pas de la création d'une onde de chaleur et ne génère donc pas de boilover « classique » mais peut donner lieu à un autre phénomène de « boule de feu », c'est le boilover dit « en couche mince ».

III-6-2-2-définition :

C'est un phénomène lié à une vaporisation de l'eau contenue dans le bac à la suite du contact d'une couche de produit à une température supérieure à 100 °C. Ce phénomène sera qualifié de phénomène éruptif en couche mince ou de boilover « en couche mince » pour reprendre la terminologie utilisée dans les publications scientifiques récentes : « thin-layer boil-over ».

Lorsque le front de flamme et la fine couche de produit, dont la température est supérieure à 100°C, impacte le fond d'eau, des bulles de vapeurs commencent à se former à l'interface gazole-eau. Ces bulles grossissent et traversent la fine couche de produit jusqu'à la surface.

Une projection peut alors se former lorsque le nombre de bulles est si important qu'elles ne peuvent être évacuées jusqu'à la surface.

Un volume plus important de vapeur est alors libéré et éjecté subitement, entraînant des gouttelettes de produits en combustion et une augmentation des flammes avec pour conséquences un accroissement du flux thermique et des « projections de gouttelettes ».

Chapitre 3 : phénomène du boilover

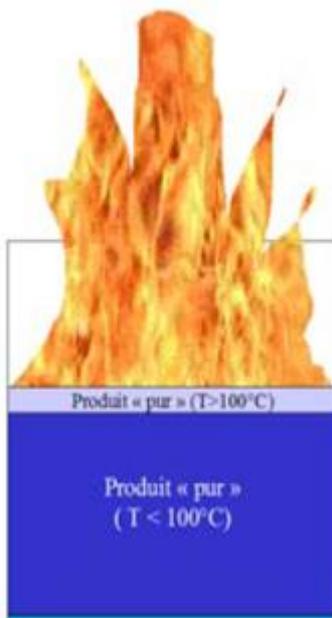
Ce phénomène lié à la vaporisation de l'eau en fond de bac est moins intense et plus bref qu'un boilover « classique » puisqu'une couche beaucoup plus fine de produit est concernée.

L'ampleur de ce phénomène va dépendre :

- de la viscosité du produit. Si le produit est peu visqueux, l'effet piston sera plus faible car la vapeur d'eau va fragmenter la couche d'hydrocarbures liquide. Il se peut même qu'il n'y ait pas d'effet piston si la viscosité du produit est trop faible.
- De l'épaisseur de la couche d'hydrocarbures liquide dont la température est supérieure à 100°C (dépend des propriétés intrinsèques de l'hydrocarbure).

III-6-2-3-Les différentes étapes conduisant à un boil-over en couche mince :

Etape 1 :



En début d'incendie du bac, le produit qui occupe le volume du bac a une composition homogène qui le restera tout au long de l'incendie. En revanche, un gradient de température apparaît et une **zone** où la température est **supérieure à 100 ° C d'épaisseur limitée** peut être identifiée.

Etape 2 :



En raison du **rayonnement** des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une augmentation locale de température sans modification de composition. il n'y a pas de formation d'onde de chaleur, la **zone chaude** ($T > 100\text{ °C}$) peu épaisse progresse vers le fond du bac à mesure que le produit se consume à la même vitesse que la surface du liquide

Etape 3 :



Une fois tout le combustible situé en dessous de cette zone de température supérieure à 100 °C a été consommée, il y a **contact** entre l'eau et cette zone.

Le contact entre le combustible chauffé à plus de 100 °C et l'eau provoque la vaporisation de cette dernière. Cette vaporisation brutale conduit à une augmentation importante de volume et joue le rôle de piston en mettant en suspension le liquide inflammable restant dans le bac

Etape 4 :



Une partie du liquide **déborde** du bac et une autre **mise en suspension** en se fragmentant en gouttes et en se vaporisant en traversant les flammes pour former une zone de combustion vive.

Figure 10 : représentation schématique des différentes phases d'un boilover en couche mince .

III-6-2-4-Conditions d'occurrence du boilover « en couche mince » :

Les conditions d'occurrence sont sensiblement les mêmes que pour un boilover classique à l'exception toutefois de la propension du produit à générer une onde de chaleur : feu de bac, présence d'eau, produit suffisamment visqueux pour s'opposer au passage de la vapeur d'eau à la surface.

Il convient donc d'identifier les séquences accidentelles associées à un feu de bac dans l'analyse des risques et l'étude de dangers. Ces séquences peuvent dépendre des caractéristiques du produit ou des installations.

III-6-2-5-Description du modèle de boilover en couche mince :

Une première phase de combustion « classique » du liquide inflammable qui se situe avant le contact entre le liquide inflammable à une température supérieure à 100°C et l'eau. Lors de cette phase, une fraction de l'énergie rayonnée par les flammes est transmise au liquide. Cette fraction conduit à l'évaporation du liquide qui va réalimenter les flammes et également préchauffer le liquide sur quelques centimètres.

Chapitre 3 : phénomène du boilover

L'épaisseur préchauffée dépend de la nature du produit impliqué. Lors de cette phase, aucune projection ne survient. La durée de cette phase peut être estimée en divisant la hauteur de liquide présente au moment de l'inflammation par la vitesse de régression qui est une caractéristique du produit en feu ainsi que de la surface du bac en feu (la vitesse de régression diminue lorsque la surface augmente). A l'issue de cette phase, la grandeur importante est l'épaisseur de liquide inflammable dont la température est supérieure à 100°C.

La deuxième phase survient lorsque la couche de liquide dont la température est supérieure à 100°C arrive au contact de l'eau présente au fond du bac : A cet instant, l'eau se vaporise brutalement et agit comme un piston en mettant en suspension la couche d'hydrocarbures située au-dessus d'elle. L'une des principales données de sortie de cette phase est la vitesse d'éjection du liquide, cette dernière dépendant de la quantité d'eau présente en fond de bac ainsi que de la composition du mélange (eau en phase vapeur, combustible en phase vapeur et liquide). La vitesse d'éjection varie entre 8 et 13 m/s et décroît sur les 10 premiers mètres, cette phase d'éjection ne sert qu'à la mise en suspension du mélange (eau + hydrocarbure).

La troisième phase consiste en la combustion de l'hydrocarbure mis en suspension : Cette phase est pilotée principalement par l'entraînement d'air au sein du jet. En effet, lors de la projection, le mélange devient rapidement trop riche en combustible et il est alors nécessaire que de l'air (oxygène) soit introduit pour observer la combustion du liquide après son évaporation. Ce modèle est issu d'un bilan thermodynamique prenant en compte l'air entraîné ainsi que le dégagement de chaleur résultant de la combustion de l'hydrocarbure en phase vapeur avec l'air entraîné.

A noter que la vitesse ascensionnelle du mélange est pilotée par la différence de densité entre gaz brûlés et gaz frais.

La dernière phase est relative à l'évaluation des conséquences en terme d'effets thermiques sur l'environnement. Compte tenu de la durée du phénomène (moins d'une minute), un calcul de dose est réalisé.

III-6-2-5-Conclusion

Le boilover en couche mince est un modèle qui a été développé par l'INERIS lorsque cette compagnie faisait des essais pour certains produits, ils ont trouvé qu'aucune onde de chaleur n'a été observée.

Donc pour que ce phénomène se réalise, il doit être visqueux et tout dépend des propriétés de l'hydrocarbure.

III-6-Conclusion générale :

La similitude entre les phénomènes de boilover « classique » et de boilover « en couche mince » réside dans l'évaporation brutale d'une couche d'eau en fond de réservoir qui entraîne la projection enflammée du produit.

Dans le cas du phénomène de boilover « classique », l'onde de chaleur descend plus rapidement que le front de flamme situé sur la partie supérieure du liquide. Aussi, lorsque l'onde de chaleur rencontre le fond d'eau, le produit est projeté entraînant un moussage (le bac déborde) et une boule de feu.

Dans le phénomène de boilover « en couche mince », le produit se consomme en gardant une composition homogène et aucune onde de chaleur ne se forme.

La source de chaleur qui peut vaporiser le fond d'eau est le front de flamme lui-même lorsqu'il arrive à proximité immédiate du fond d'eau. Dans ce cas, on retrouve la projection du produit (boule de feu) mais les quantités en jeu sont beaucoup plus faibles et le phénomène de moussage n'est pas observé. La boule de feu est donc plus « petite » et sa durée de vie plus courte, engendrant des effets de moindre intensité.

Il convient aussi de remarquer que dans le cas du phénomène de boilover « classique », plus le bac est plein, plus les effets peuvent être importants mais plus le temps de déclenchement est grand et vice-versa.

Dans le cas, du phénomène de boilover « en couche mince », les effets ne dépendent pas ou presque pas du niveau de remplissage au début de l'incendie du bac. Aussi, les effets maximaux peuvent être atteints dans des conditions défavorables du point de vue cinétique (bac peu rempli). Néanmoins, les effets, sont bien moindres par rapport au boilover classique.

IV-1 - Les stratégies de lutte contre l'incendie

IV-1 -1-Stratégie passive :

Aucune activité de lutte contre l'incendie :

- Laisser le contenu brûler ;
- Évacuation de la zone si nécessaire.

Application de stratégie passive :

- Moyens humains et matériels très insuffisants ;
- Danger imminent ;
- Boilover ;
- échec de réservoir ;

IV-1 -2-Stratégie défensive :

Protège le personnel et les équipements exposés : Laisser le contenu du bac brûler en toute sécurité

Application de la stratégie défensive :

- Feu de bac avec un toit flottant submergé obstruant de grandes parties ;
- Manque de ressources empêchant une stratégie offensive réussie.

IV-1-3-Stratégie offensive :

Vie est en danger imminent, alors une action d'extinction agressive focalisée de suppression du feu devrait appuyer le sauvetage.

- L'exposition probable des équipements non impliqués pourrait de manière significative augmenter le risque s'ils devenaient impliqués ;
- Si des moyens adéquats sont disponibles (personnel, équipement et matériaux) dans des délais de temps acceptable pour une extinction totale du feu.

IV-2-Les préventions :

Préventions liées au stockage des hydrocarbures :

La prévention liée au stockage des hydrocarbures consiste à la réduction des risques à la source par l'instauration d'un programme de contrôles des

Chapitre 4 : Prévention contre les accidents liés au stockage :

constituants du réservoir et la mise sur place d'une série de mesures préventives pour l'amélioration des conditions de travail.

La prévention consiste aussi à imposer des règles dans les zones de stockage. Ces règles concernent en général le confinement et contrôle des déversements accidentels et les moyens de lutte contre l'incendie adapté aux risques.

IV-2-1-Mesures prévention contre le risque explosion incendie :

- Mise à la terre des réservoirs ;
- Les réservoirs de stockage sont mis à la terre, une prise par 20m de circonférence et interconnectées entre elles.

IV-2-2-Mesures de prévention générale contre l'incendie :

- Les toits des bacs doivent être inspectés à des intervalles fréquents. Toute présence de vapeurs inflammables à l'intérieur des caissons devra être signalée au responsable ;
- Les bacs doivent être équipés de reniflard adéquat pour régler la pression intérieure ;
- Les arrête-flammes doivent être contrôlés fréquemment ;
- Les orifices de trous de jauges et de trous d'homme doivent être maintenus fermés, lorsque leur ouverture n'est pas motivée par un but d'exploitation ou d'entretien ;
- Il n'est autorisé à descendre ou à marcher sur les toits flottants sans motif de service ; Lorsqu'il y a des concentrations de vapeurs d'hydrocarbures, le port d'un appareil ou masque respiratoire filtrant approprié est obligatoire ;
- Les réseaux de terre des parafoudres et ceux destinés à l'élimination de l'électricité statique sont séparés ;

IV-2-3-Installation des liaisons équipotentielles :

- Des liaisons équipotentielles entre le toit, la robe, l'échelle, doivent être reliés électriquement entre eux afin d'éliminer les différences de potentielles ;
- Le personnel autorisé à monter sur les toits devra porter des chaussures sans clous ni ferrures. Seuls les outils ne produisant pas d'étincelles y sont autorisés
- Les récipients et les flacons utilisés pour l'échantillonnage du pétrole doivent être en cuivre ou en laiton ;
- Le pétrole répandu sur les toits doit être immédiatement nettoyé ;

Chapitre 4 : Prévention contre les accidents liés au stockage :

- Les chiffons usagés ou imbibés d'hydrocarbures ne doit vent pas être laissés sur les toits des réservoirs ou à l'intérieur des cuvettes de rétention ; ils doivent être déposés dans des récipients prévus à cet effet ;
- Pour s'éclairer, il ne devra être employé que les types de lampes étanches autorisées par le département ;
- Chaque fois qu'un bac de stockage est mis hors de service pour nettoyage, réparation ou pour modification, toutes les canalisations reliées à ces réservoirs doivent être déconnectées et obturées. Le service entretien doit s'assurer de l'isolement du réservoir ;
- Avant de commencer un travail sur les réservoirs protégés cathodiquement, un préavis raisonnable doit être donné au service corrosion qui devra couper la source de courant électrique et mettre à terre les bacs intéressés ;
- Avant d'entreprendre tout travail impliquant l'utilisation de feux nus, à l'intérieur du parc de stockage, une autorisation écrite devra être formulée par l'entrepreneur du travail à faire au responsable du département ;
- inspection des lieux où s'effectuent des travaux à chaud pour s'assurer que le travail se déroule conformément aux conditions spécifiées sur le permis de travail à chaud.

IV-2-4- Mesures de prévention contre la corrosion :

La corrosion est un phénomène électrochimique qui aboutit à la dégradation des structures métalliques (rouille ou oxydation du métal). Les altérations se traduisent par des microfissures, cratères amincissement des parois des viroles , a long terme ces dégradations peuvent être à l'origine d'accidents majeurs, telle la rupture du bac. Pour cela, la protection cathodique et les mesures de prévention suivantes sont à mettre en œuvre pour lutter contre la corrosion -Contrôle périodique préventif :

- Contrôle et mesures des épaisseurs de parois ;
- Contrôle des joints de soudures ;
- Contrôle des fonds de bac et des assises en béton ;
- Epreuves hydrostatiques.

IV-2-5-Débordement ou avarie d'une capacité :

- Le débordement d'un réservoir, consécutif généralement à une fausse manœuvre, un défaut de surveillance, ou à l'expansion thermique, doit donner lieu à des mesures particulières, effectuées dans un ordre déterminé ;
- Arrêter le remplissage ;

Chapitre 4 : Prévention contre les accidents liés au stockage :

- Mettre en fonctionnement, pendant quelques minutes le circuit de refroidissement, ou arroser à la lance le toit et paroi du réservoir ;
- Recouvrir l'huile, se trouvant dans la cuvette, de mousse ;
- Faire procéder au nettoyage de la cuvette de rétention ;
- En cas de fuite importante sur la paroi, procéder à la vidange du réservoir, et pomper parallèlement les hydrocarbures se trouvant dans la cuvette ;
- En cas de fuite par le fond du réservoir, procéder comme ci-dessus ou maintenir une garde d'eau à la partie inférieure du réservoir, en attendant la vidange ;

IV-2-6-Mesures de prévention contre la pollution des sols et plan d'eau

- Afin d'éviter tout pic de pollution faisant suite à de fortes pluies ou fuite de produit les zones de stockage, il est prévu un réseau de collecte raccordé à un ou plusieurs bassins de décantation ;
- Les eaux ainsi récupérées ne sont rejetées dans le milieu récepteur qu'après pré traitement. Si nécessaire, leur rejet pourra être étalé dans le temps afin de répondre aux exigences de la direction de l'environnement.

IV-3-Systèmes de Protection des réservoirs :

• Mousse :

Les réservoirs sont protégés par réseau de mousse. Les installations fixes de mousse doivent permettre de débiter un tapis de mousse de 20cm en 10 minutes sur la surface du joint annulaire.

• Couronne de refroidissement :

Pour le refroidissement des réservoirs il est prévu des couronnes de refroidissement. Ces couronnes sont équipées de diffuseurs vissés et facilement démontables.

Précautions et consignes d'extinction des feux de bacs :

- Les Feux d'évent :

Cas n°1 : flamme rouge et fumée noire :

L'atmosphère est riche en HC

Chapitre 4 : Prévention contre les accidents liés au stockage :

- Eteindre la flamme ;
- Ne pas refroidir ou envoyer de la mousse, ceci va faire pénétrer l'air.

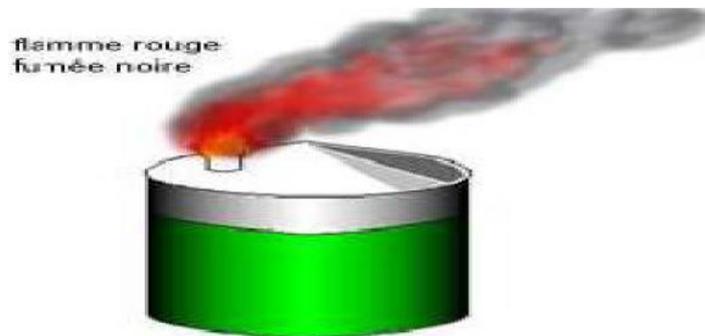


Figure 1 : flamme rouge et fumée noire

Cas n°2 : flamme bleu / verte :

- L'atmosphère est proche de la limite d'inflammabilité, risque d'explosion
- Envoyer du produit pour diminuer la phase gazeuse ;
- Ne pas refroidir ou envoyer de la mousse.



Figure 2 : flamme bleu / verte et fumée noire

Cas n°3 : fumée noire sans flamme :

- Il y a combustion interne sans risque d'explosion ;
- envoyer de la mousse par les moyens fixes ;
- il faut refroidir le bac.

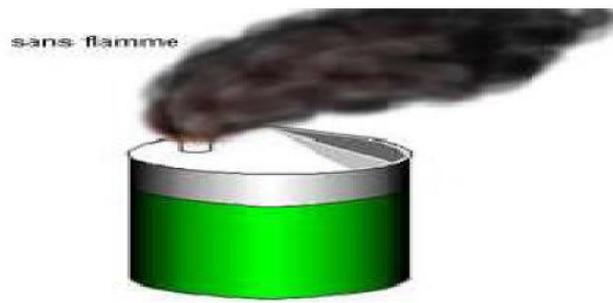


Figure 3 : Les Feux d'évent

- **Les Feux de joint :**

L'extinction des feux de joint peut être complète à 100% si pas d'endommagement du toit ;

- Utilisation des moyens fixes d'extinction ;
- Les lances monitors sont déconseillées ;
- Difficulté d'atteindre le joint ;
- Risque de faire couler le toit.

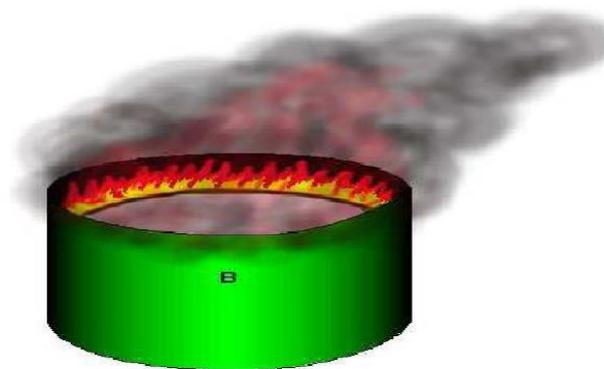


Figure 4 : Les Feux de joint .

- **Feux de surface obstruée par un toit coulé :**

Ces feux sont difficiles à éteindre.

- Éviter l'injection de mousse par le bas ;
- Envoyer la mousse par le haut ;
- Prévoir un supplément de mousse pour combler les zones obstruées.

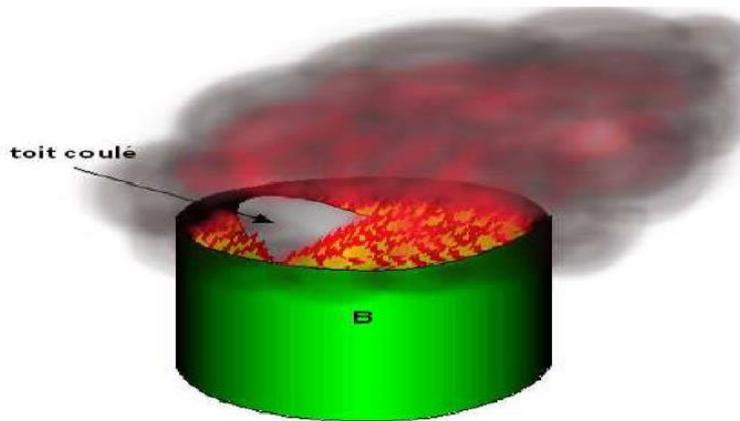


Figure 5 : Feux de surface obstruée par un toit coulé .

- **Feux de pleine surface :**

Feux durs mais moins grave que les feux de bac avec un toit coulé.

- Par expérience, destruction des moyens fixes d'extinction ;
- Moyens Mobiles par le haut avec débit haut ;
- Injection de mousse par le bas.

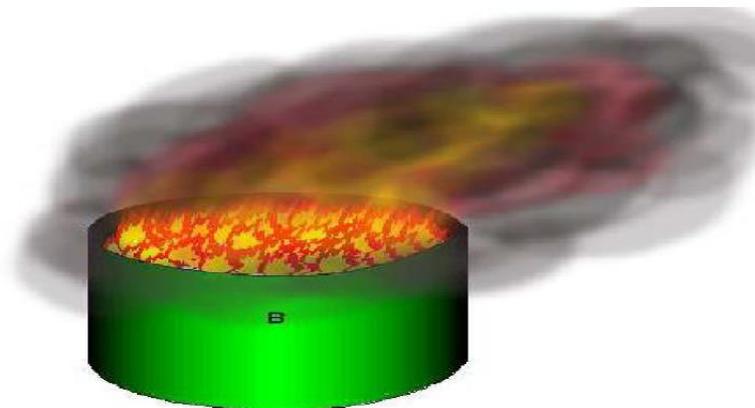


Figure 6 : Feux de pleine surface.

- **Les feux de cuvette :**

- Contenir les hydrocarbures ;
- Envoyer la mousse sur les parois des réservoirs au canon, Les déversoirs en appoint ;
- Protéger les réservoirs les plus menacés ;
- bac en contact direct avec les flammes ;

Chapitre 4 : Prévention contre les accidents liés au stockage :

- Produit stocké est sensible à la chaleur ;
- Contrôle et extinction de la cuvette de rétention avant l'extinction des feux de bac.

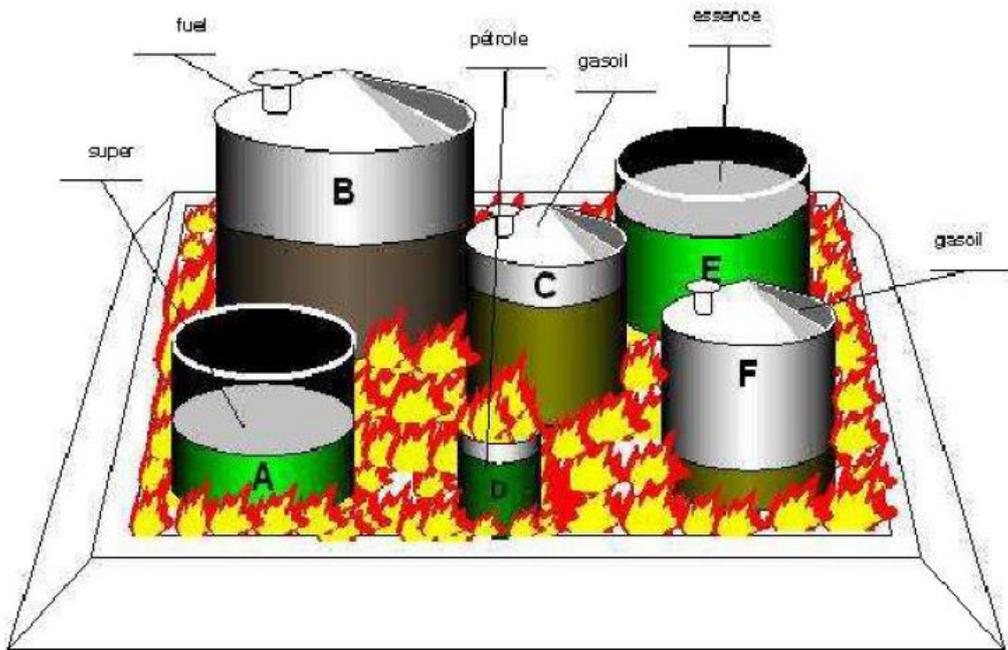


Figure 7 : Les feux de cuvette.

IV-4-Historique des accidents de boilover :

1/Lieu et date : Yokkaichi (Japon) en 15/10/1955

Type de bac et produits impliqués :

Bac à toit fixe de 8 000 m³ contenant 7 000 m³ de FO

Evènements initiateurs :

Incendie du bac puis formation d'une onde de chaleur vaporisant le fond d'eau

Caractéristiques du boilover et conséquences :

- Temps déclenchement boilover : 6,5 h
- Formation d'une nappe en feu de 10 000 m²
- Victimes : plusieurs pompiers Dégâts : + 4 M de yens, destruction de 5 bacs

Moyens de protection :

- Maîtrise du sinistre après 28 h d'intervention,
- Utilisation de 79 fourgons pompes,
- Absence de cuvette de rétention et de merlon

Chapitre 4 : Prévention contre les accidents liés au stockage :

- Stockage d'émulseur insuffisant

2/ Lieu et date : Tacao (Venezuela)19/12/2982

Type de bac et produits impliqués :

Bac à toit fixe de Centrale thermique de 40 000 m³ rempli au tiers de FO n°6

Origines d'accident :

FO n°6 en phase gazeuse surchauffée à 80 °C au lieu de 65 °C

Evènements initiateurs :

Explosion du ciel gazeux, éjection du toit fixe, incendie de bac...

Caractéristiques du boilover et conséquences :

- Temps déclenchement boilover : 6 h
- Rayon boule de feu : 150 m
- Élévation boule de feu : entre 300 et 600 m
- Formation d'une nappe en feu de 548 m de rayon
- Victimes : 200 morts et 500 blessés

Moyens de protection :

- Maîtrise du sinistre après 20j d'intervention,
- Destruction partielle du réseau d'eau incendie et des installations fixes de mousse du bac
- Evacuation de 40 000 personnes par l'armée.

3 / Lieu et date : MilfordHaven (GB) 30/08/1983

Type de bac et produits impliqués :

Bac à toit flottant de 94 110 m³ de capacité contenant 47 000 m³ de brut léger

Origines d'accident :

- Fissures dans le toit flottant (forts vents)
- Retombées d'escarbilles provenant d'une torchère avoisinante

Evènements initiateurs :

Inflammation des vapeurs de brut par escarbilles

Caractéristiques du boilover et conséquences :

- Temps déclenchement boilover : 12 à 13 h pour le 1er boilover, 2 h plus tard pour le second
- Rayon boule de feu : 90 m
- Elévation boule de feu : 150 m Formation d'une nappe en feu de 16 722 m² soit d'un rayon d'environ 73 m
- Victimes : 6 pompiers blessés
- Dégâts : 11 M\$

Moyens de protection :

- Maîtrise du sinistre après 60 h d'intervention
- Intervention de 150 pompiers avec 50 véhicules dont 44 pompes et 6 plates-formes élévatrices,
- Utilisation 70 camions citernes d'émulseur et 763 m³ d'émulseurs

4/ Lieu et date : Thessalonique(Grèce) 24/02/1986

Type de bac et produits impliqués :

- a) Bac à toit fixe de 17 900 m³ plein de brut léger
- b) Bac à toit fixe de 10 350 m³ plein de FO

Origines d'accident :

- Feu de cuvette par épandage de FO
- Fuite alimentant le feu

Evènements initiateurs :

- a) Incendie du bac, formation d'une onde de chaleur vaporisant le fond d'eau
- b) Echauffement prolongé (5 h) du bac par feu de surface et feu de cuvette permettant la vaporisation de l'eau en fond de bac

Caractéristiques du boil-over et conséquences :

- a) - Temps déclenchement boilover : 30 h
 - Elévation boule de feu : 300 m Projections de brut enflammé à 150 m
 - Formation d'une nappe en feu de 35 000 m² soit d'un rayon d'environ 105 m
- b) Temps déclenchement boilover : 5j

Victimes : 8 pompiers blessés

Dégâts : destruction de 10 bacs sur 12

Moyens de protection :

- 7 j d'intervention pour éteindre 35 000 m² de feu de cuvette et 10 bacs en feu,
- Faibles quantités d'agents extincteurs

5/ Lieu et date : Port Edouard Herriot (France) 02/06/1987

Type de bac et produits impliqués :

Bac à toit fixe de 2 900 m³ rempli au tiers de gazole

Origines d'accident :

- Fuite d'additif (PE=12°C)
- Flash de l'aérosol formé
- Embrassement de 4 000 m² de cuvette

Evènements initiateurs :

- Feu de cuvette généralisé, surchauffe du bac de gazole
- vaporisation du fond d'eau présent dans le bac

Caractéristiques du boilover et conséquences :

Temps déclenchement boilover : 5,5 h

Rayon boule de feu : 100 m

Élévation boule de feu : 450 m

Formation d'une nappe en feu de 5 000 m²

Victimes : 2 morts et 15 blessés

Dégâts : destruction de 24 bacs

Moyens de protection :

- Intervention de 200 pompiers, durant 22 h
- Utilisation de 200 m³ d'émulseurs

6/ Lieu et date : Eyguières (France) 04/07/1995

Type de bac et produits impliqués :

Bac de 2,5 m³ de lubrifiant dans un entrepôt

Origines d'accident :

- Feu de bac
- Canalisation contenant de l'eau fondue d'où présence d'eau dans le fond du bac

Evènements initiateurs :

Incendie du bac puis formation d'une onde de chaleur vaporisant le fond d'eau

Caractéristiques du boilover et conséquences :

- Temps déclenchement boilover : + 2 h
- Formation d'une boule de feu roulant au plafond (embrasement généralisé de l'entrepôt)
- Victimes : 3 pompiers blessés

Moyens de protection :

- Utilisation lances à mousse (extinction du feu en 5 h),
- Evacuation d'un supermarché et de villas,
- Interruption de la circulation,

IV-5-Conclusion :

Pour conclure, on peut dire que la politique de prévention doit avoir pour objectif de prémunir la naissance du feu et d'empêcher son développement ainsi que sa propagation. Il s'agit principalement de prendre des mesures pour éviter les sources d'inflammations, instaurer des contrôles périodiques, de disposer de moyens de lutte contre l'incendie bien adaptées aux installations.

V-1-modelisaion du phénomène et ses conséquences :

V-1-1-Introduction

Le phénomène de boilover est intéressant notamment en ce qui concerne son mécanisme et la prédiction théorique de son déclenchement. Les efforts des chercheurs se sont concentrés sur des paramètres tels que la profondeur de la couche de combustible, le type de combustible et la température de la zone chaude pour définir les conditions d'apparition de la zone chaude.

La température de la zone chaude pour définir les conditions d'apparition du boilover en zone chaude et son intensité.

. En particulier, il a été démontré que la profondeur de la couche de combustible a un impact important sur le temps de pré-ébullition.

V-1-2-Prédiction du temps de boilover :

V-1-2-1-Introduction :

La prédiction du temps de boilover est importante pour alerter à temps à intervenir au lieu de l'accident, pour obtenir des informations sur la quantité de carburant restant dans le réservoir avant le phénomène du boilover et pour estimer ses conséquences.

Des corrélations empiriques et semi-empiriques ont été présentées pour prédire le temps du boilover. (Casal, 2017; Buang, 2014; Yang et al., 2013;Kong et al., 2017; LASTFIRE, 2004, 2006, 2007).

La prédiction du temps de boilover est un facteur très important pour modéliser les conséquences du phénomène .D'après les publications scientifiques ils existent différents paramètres qui influencent sur la prédiction du temps de boilover, et chacune des corrélations empiriques prend en compte différents paramètres pour la prédiction.

V-1-2-1-1Corrélation de yang et al (2013) :

$$t_b = -20,5235 + 557,2043 \frac{H_o}{\sqrt{D}}$$

Ou :

t_b : temps de déclenchement de boilover (min)

H_o :la hauteur initial de la couche d'hydrocarbure (m)

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

D :diamètre de réservoir (m)

V-1-2-2-Correalation de yang et al (2013) :

$$t_b = \frac{H_o}{V_{hz}} - k (H_o + H_w)$$

Ou :

t_b : temps de déclanchement de boilover (min)

H_o :la hauteur initial de la couche d'hydrocarbure (m)

V_{hz} : la vitesse de la zone chaude (m/min)

H_w : la hauteur de la couche d'eau (m)

K : coefficient, lorsque la température du combustible est inférieure sont point d'inflammation, k = 0, sinon k = 1.

V-1-2-1-3-la Corrélation de casal (2017) :

$$t_b = \frac{\rho_1 C_p H_{HC} (T_{HW} - T_a)}{Q_f - \dot{m}_v (\Delta h_v + C_p (T_{0av} - T_a))}$$

Ou :

t_b : temps de déclanchement de boilover (s)

ρ₁ : Densité du combustible à la température Ta (kg/m³)

C_p : chaleur massique (J/kg K)

H_{HC} : épaisseur initiale du combustible dans le réservoir avant le début de l'incendie (m)

T_{HW} : La température de l'onde de chaleur au le moment de l'apparition du boilover (K), T_{HW} peut être estimé à partir de la courbe de distillation du combustible

T_a : Température ambiante (K)

Q_f : Flux de température vers le combustible depuis sa surface (≈60kW/m²)

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

\dot{m}_v : Le flux massique de combustion par surface (kg/ m²s)

Δh_v : Température d'évaporation à la température Ta (kj/kg)

T_{0av} : Point d'ébullition moyen du combustible (K)

V-1-2-1-4- corrélation de Kong et al. (2017) :

$$t_b = \frac{\rho}{\dot{m}_s + v_2 \rho} h_0$$

t_b : temps de déclenchement du boilover (s)

ρ : densité du combustible (kg/m³)

\dot{m}_s : Taux de combustion de la masse stable (kg/m²s)

h_0 : épaisseur initiale du combustible (mm)

v_2 : la vitesse de propagation de l'onde de chaleur (m/s)

V-1-2-1-5-Correlation de LASTFIRE (2004,2006, 2007) :

$$t_{bo} = 8.18 Z_f t_{bo} = Z_f / V_{hz}$$

t_{bo} : temps de déclenchement du boilover (s)

Z_f : Épaisseur initiale du combustible (mm)

V_{hz} : la vitesse de la zone chaude (m/s)

V-1-2-1-6-Correlation de Buang (2014) :

$$t_{bo} = \frac{\rho_1 z_f C_p (T_{hz} - T_{st}) + (0.001 \Delta h_c)}{Q_f + \dot{y} \rho_1 C_p (T_{hz} - T_{st})}$$

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

t_{bo} : temps de déclenchement du boilover	(s)
ρ_1 : densité du combustible à température ambiante	(kg/m ³)
z_f : épaisseur initiale du combustible dans le réservoir	(m)
C_p : Chaleur spécifique du combustible liquide à la température de stockage (J/kg K)	
T_{hz} : Température de l'onde de la zone chaude avant l'apparition du boilover	(K)
T_{st} : Température de stockage	(K)
$0.001\Delta h_c$: Quantité de chaleur nécessaire pour élever la température et vaporiser la fraction la plus volatile du combustible	
Q_f : Taux de chaleur de la flamme qui pénètre dans le combustible par unité de surface	(W/m ²)
\dot{y} : Taux de régression de la surface du combustible	(m/s)

V-1-2-1-7- Corrélation de Buang (2014) :

$$t_{bo} = \frac{z_f \rho C_p (T_{hz} - T_{st})}{\dot{q} A - \dot{m}_v \Delta h_l h}$$

t_{bo} : temps de déclenchement du boilover	(s)
C_p : Chaleur spécifique du combustible	(J/kg K)
z_f : la hauteur du combustible	(m)
T_{st} : Température de stockage	(K)
T_{hz} : la Température de la couche chaude	(K)
\dot{q} : Taux de flux flamme-combustible	(W/m ²)
A : section du réservoir	(m ²)
\dot{m}_v : Taux de combustion	(kg/s)

Δh_{lh} : Chaleur latente de vaporisation du combustible (J/kg)

V-1-2-2 Conclusion :

D'après les études expérimentales et une comparaison avec les différentes corrélations, ils ont conclu que la meilleure corrélation adéquate avec la prédiction du temps de déclenchement de boilover est celle de Buang (2014).

V-1-3-EFFET BOULE DE FEU

La prédiction des conséquences du boilover est un facteur important dans l'évaluation des risques d'un incendie de réservoir. Il a été prouvé que la conséquence la plus grave et la plus dangereuse du boilover est la formation d'une boule de feu et l'éjection du combustible chaud hors du réservoir, qui peut libérer une énergie rayonnante élevée et menacer la vie des intervenants lors de l'accident.

Afin d'estimer les effets du rayonnement de la boule de feu du boilover avec une grande précision, il est essentiel de calculer la masse de combustible à l'intérieur de la boule de feu. En analysant les profils de température, il est possible d'estimer le taux de régression de la surface du combustible et, finalement, la masse de combustible dans le réservoir pendant le feu de réservoir.

Voici quatre corrélations empiriques qu'on peut appliquer pour la prédiction des conséquences du boilover pendant un feu de réservoir (Buang, 2014 ; Van den Bosch et Weterings, 2005; Casal, 2017 ; CCPS, 2000).

V-1-3-1-corrélation de Casal (2017)

V-1-3-1-1- la durée de la boule de feu :

$$t = 0.9 M^{0.25}$$

t : la durée de la boule de feu (s)

M : Masse de combustible à l'intérieur de la boule de feu (kg)

V-3-1-2-Diamètre de la boule de feu (m) :

$$D = 8.66 M^{0.25} t_i^{1/3} \quad \text{pour : } 0 \leq t_i \leq t/3$$

$$D_{\max} = 5.8 M^{1/3} \quad \text{pour : } t/3 < t_i \leq t$$

Ou :

D_{\max} est la valeur maximale de la boule de feu (m)

t_i est le temps a l'instant i (s)

V-1-3-1-3- la hauteur de la boule de feu (m) :

$$H=0.5D \quad \text{pour : } 0 \leq t_i \leq t/3$$

$$H=3 D_{\max} t_i/2t \quad \text{pour : } t/3 < t_i \leq t$$

V-3-1-4- fraction de rayonnement :

$$\eta_{\text{rad}} = 0.00325 P^{0.32}$$

p : la pression dans le réservoir avant l'explosion (N/m²)

si la pression dans le réservoir est inconnue on prend : $\eta_{\text{rad}}=1/3$

V-1-3-1-5- la puissance de rayonnement (kW/m²) :

$$E_{\max}=0.0133 \eta_{\text{rad}} \Delta H_c M^{1/12} \quad \text{pour : } 0 \leq t_i \leq t/3$$

$$E=E_{\max} \left[\frac{2}{3} \left(1 - \frac{t_i}{t} \right) \right] \quad \text{pour : } t/3 < t_i \leq t$$

ΔH_c : Chaleur de combustion (valeur minimale) du combustible (kJ/kg)

M : Masse de combustible à l'intérieur de la boule de feu (kg)

V-1-3-1-6- facteur de vue :

$$F_{\max} = \frac{D^2}{4 \left[\frac{D}{2} + d \right]^2}$$

$D/2+d$: est la distance entre la surface qui reçoit le rayonnement et le centre de la boule de feu. (m)

$$F_{\text{vertical}} = F_{\max} \cos \alpha \quad \text{pour une vue vertical}$$

$$F_{\text{horizontal}} = F_{\max} \sin \alpha \quad \text{pour une vue horizontal}$$

V-1-3-2-correlation de CCPS (2000) :

V-1-3-2-1- la durée de la boule de feu :

$$t_{fb} = 0.45 M^{1/3} \quad \text{pour } M < 30000 \text{ kg}$$

$$t_{fb} = 2.6 M^{1/6} \quad \text{pour } M > 30000 \text{ kg}$$

M : la masse initial de carburant dans la boule de feu (kg)

V-1-3-2-2-Diamètre de la boule de feu (m) :

$$D_{fb} = 5.8 M^{1/3}$$

V-1-3-2-3 Le centre de la boule de feu à partir du sol (m) :

Ce paramètre représente la hauteur maximale du centre de la boule de feu au-dessus du sol, Cette hauteur est atteinte à la moitié de la durée de la boule de feu.

$$Z_{fb} = 0.75 D_{fb}$$

V-1-3-2-4 Flux émis en surface ou puissance émissive en surface (kW/m²) :

$$E = \frac{f_R m_{vap} \Delta h_c}{\pi D_{fb}^2 t_{fb}}$$

Le terme f_R représente la fraction radiative du dégagement total de chaleur par combustion du combustible concerné, Prugh (1994) suggère une gamme de valeurs allant de **0.25** à **0.40** pour la fraction radiative, ce qui est assez similaire à la plage de valeurs de **0,3** à **0,4** suggérée par le CCPS (2000).

V-1-3-2-5 La distance entre la cible et le centre de la boule de feu (m) :

$$L = (X^2 + Z_{fb}^2)^{0.5}$$

X : Distance horizontale de la cible au centre de la boule de feu au sol (m)

V-1-3-2-6 facteur de vue :

$$F = \frac{D^2}{4L^2} \cos \theta$$

V-1-3-2-7- La pression partielle de l'eau :

$$P_w = 1013.25 RH e^{14.4114 - \frac{5328}{T_{atm}}}$$

RH : humidité relative (%)

T_{atm} : température de l'air (K)

V-1-3-2-8-Distance entre la cible et le niveau de la boule de feu (m) :

$$R_T = L - 0.5 D_{fb}$$

V-1-3-2-9-coefficient de transmission :

$$\tau = \frac{2.02}{(D_w R_T)^{0.09}}$$

V-1-3-2-10- Le flux de puissance reçu :

$$E_R = E F \delta \tau$$

V-1-3-3- corrélation de Buang (2014) :

V-1-3-3-1- la durée de la boule de feu :

$$t_{fb} = 1.04 m_{vap}^{0.253}$$

t_{fb} : la durée de la boule de feu (S)

m_{vap} : la masse du combustible dans la boule de feu (Kg)

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

V-1-3-3-2- le diamètre de la boule de feu :

$$D_{fb} = 5.95 m_{vap}^{0.253}$$

D_{fb} : le diamètre de boule de feu (m)

V-2-Partie calcul

Données :

Type de produit : fuel oil N°.6

Température de stockage : 333 K

Température critique : 929,8 K

Pression critique : $1,53 \cdot 10^6$ pa

Température d'ébullition initiale : 453 K

Température d'ébullition finale : 853k

Température d'ébullition moyenne : 621.6

Température ambiante : 298 K

Diamètre du réservoir : 55 m

Hauteur du réservoir : 17 m

Flux de chaleur rayonnant à la surface du combustible \dot{q} : 207054.3W /m²

SG : 0.892

Masse volumique a 20 C° : 917 kg /m³

La hauteur du liquide dans le reservoir = 6.1 m

Humidité relative RH=0.7

L'absorptivité du récepteur δ : 0.9

V-2-1-La prédiction du temps de déclenchement de boilover :

$$t_{bo} = \frac{z_f \rho C_p (T_{hz} - T_{st})}{\dot{q} A - \dot{m} v \Delta_{hlh}}$$

- Calcul de la chaleur spécifique C_p :

$$C_p = \frac{1}{SG^{0.5}} (1.685 + 0.039T)$$

SG : densité relative a 60 F°/60F)

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilver classique :

T : température de stockage C°

$$C_p = (1/0.892^{0.5}) \times (1.685 + (0.039 \times 59,85)) = 4255.511688827140 \text{ J kg}^{-1} \text{ C}^{\circ-1}$$

- Calcul de la chaleur latente de vaporisation :

$$\Delta h_{lh} = \frac{251.47 - 377.136 \times 10^{-3} T_b}{SG}$$

Δh_{lh} : est la chaleur latente de vaporisation de l'hydrocarbure liquide à son point d'ébullition, exprimée en KJ kg-1

T_b : est le point d'ébullition moyenne , C°

$$\Delta h_{lh} = \frac{251.47 - 377.136 \times 10^{-3} \times 348,45}{0.892} = 134593.0053811659 \text{ J/Kg}$$

- Chaleur de combustion : kJ kg-1

$$\Delta h_c = 50462.7 - 8546.1 \times SG$$

$$\Delta h_c = 50462.7 - 8546.1 \times 0.892 = 42839578.80000000 \text{ J/Kg}$$

- la vitesse de régression de la surface du liquide , v_a (m/s) :

$$v_a = 1.27 \times 10^{-6} \frac{\Delta h_c}{\Delta h_{lh} + C_p(T_b - T_{st})}$$

$$v_a = 1.27 \times 10^{-6} \frac{42839578.80000000}{134593.0053811659 + 4255.511688827140 (621.6 - 333)} = 3.992435640457665 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

- taux de combustion (taux de vaporisation) \dot{m}_v : (Kg /s)

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_v}{A} = v_a \rho_L$$

$$\dot{m}_v = v_a \rho_L A$$

Ou :

\dot{m}_v : Le flux massique de combustion par surface : (Kg/m² s)

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

A : la section de réservoir (m^2)

ρ_L : la masse volumique du liquide (Kg/m^3)

$\dot{m}_v = 3.992435640457665 \times 10^{-5} \times 890 \times$
 $2375.829444277281 = 84.419580725933980 \text{ Kg /s}$

- **Fraction du liquide vaporisé :**

La fraction du combustible vaporisé dans un incendie de réservoir de stockage représente la quantité de composants légers du mélange de combustible qui ont été consommés depuis le début de l'incendie jusqu'à l'apparition de boilover.

La fraction du liquide vaporisé, s'exprime en fonction de temps de déclenchement de boilover t_{bo} , la vitesse de régression de surface v_a et La hauteur initial de liquide combustible dans le réservoir Z_f .

$$X_v = \frac{v_a \times t_{bo}}{Z_f}$$

- **la température de la zone chaude :**

La température à laquelle la plupart des composants légers du mélange combustible ont été vaporisés est considérée comme la température de la zone chaude.

Par conséquent, la température de la zone chaude peut être liée à la fraction de carburant vaporisée. Par la corrélation de Riazi & Daubert (1987).

$$T = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 \ln(x + 0.5)$$

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ ont été obtenus expérimentalement au moyen d'une de la courbe de volatilité/distillation des hydrocarbures.

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

groupe	Tb initial (K)	Constante					
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
naphta léger	283.15	14275.23	-39093.71	30313.9	-19093.5	5713.55	20522.3
naphta lourd	310.93	23873.55	-65672.82	50898.4	-32208.59	9634.06	34291.8
jet naphta	389.82	2936.27	-7364.53	6174.37	-4551.89	1612.38	3886.81
kéroséne	398.71	6372.93	-16789.44	13343.9	-8622.18	2638.58	8820.57
fuel oil	455.37	12317.2	-32786.53	25335.8	-16093.8	4917.36	17248.8
gas oil	488.71	5409.57	-13616.02	10697.1	-6889.45	2114.95	7198.81

Tableau 1 : constante pour résoudre l'équation de la température

pour calculer la température de la zone chaude T_{hz} on suppose une valeur initial $T_{hz, initial} = 130\text{ C}^\circ$, on calcule le t_{bo} , puis la fraction de vaporisation , le résultat obtenu on l'utilise pour calculer une nouvelle T_{hz} par la corrélation de Riasi & Daubert (1987).

Le processus est répété jusqu'à ce que la différence entre les valeurs nouvellement obtenues T_{hz} et la valeur précédente soit inférieure a degré ($T_{hz(i+1)} - T_{hz(i)} < 1$) .

- **résultat de calcul itératif :**

$t_{bo}(s)$	X_v	$T_{hz}(k)$
4585,869924	0,030014411	405,1052293
8235,746018	0,053902764	431,0430451
11198,32259	0,073292758	447,5686957
13085,85644	0,085646622	456,3693427
14091,05251	0,092225607	460,5810067
14572,10216	0,095374066	462,489276
14790,06168	0,096800606	463,3320093
14886,31735	0,097430597	463,6999215

Tableau 2 : calcul itératif du t_{bo}

$t_{bo} = 14790,06168$ (s) = 4 heures , 6 minutes et 30 secondes

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

$$X_v = 0,096800606$$

$$T_{hz} = 463,3320093 \text{ K} = 190,1820093 \text{ C}^\circ$$

V-2-2-L'influence de la température de stockage et la masse volumique du liquide sur le t_{bo} :

Un paramètre pris en compte dans le bilan thermique pour prédire le début du boilover est la température de stockage du combustible. Le temps de boilover a été prédit pour une gamme de température de stockage afin de déterminer dans quelle mesure ce paramètre influence le temps de déclenchement du boilover, en tenant compte la variation de la densité du fluide en fonction de la température du stockage.

T_{st} (k)	ρ (kg /m ³)
288	917,986684
294	914,255063
300	910,523443
313	902,438265
333	890

Tableau 3 : la variation de la masse volumique du liquide en fonction de la température de stockage

- **Résultat du calcul itératif de t_{bo} en fonction de la hauteur de produit Z et la température du stockage T_{st} :**

Z (m)	Tbo(s)	xbo	Thz	Tst=288 K
0,1	205,484929	0,119654	475,160384	
1,22	2506,91613	0,119654	475,160384	
2,44	5013,83226	0,119654	475,160384	
3,66	7520,7484	0,119654	475,160384	
4,88	10027,6645	0,119654	475,160384	
6,1	12534,5807	0,119654	475,160384	

Z	tbo	xbo	Thz
0,1	216,890605	0,11787056	474,340696
1,22	2646,06538	0,11787056	474,340696
2,44	5292,13077	0,11787056	474,340696

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilver classique :

3,66	7938,19615	0,11787056	474,340696	Tst=294 K
4,88	10584,2615	0,11787056	474,340696	
6,1	13230,3269	0,11787056	474,340696	

Z	tbo	xbo	thz	Tst=300 K
0,1	226,348043	0,11563957	473,292547	
1,22	2761,44612	0,11563957	473,292547	
2,44	5522,89224	0,11563957	473,292547	
3,66	8284,33837	0,11563957	473,292547	
4,88	11045,7845	0,11563957	473,292547	
6,1	13807,2306	0,11563957	473,292547	

Z	tbo	xbo	Thz	Tst=313 K
0,1	241,438734	0,11010896	470,58069	
1,22	2945,55256	0,11010896	470,58069	
2,44	5891,10512	0,11010896	470,58069	
3,66	8836,65768	0,11010896	470,58069	
4,88	11782,2102	0,11010896	470,58069	
6,1	14727,7628	0,11010896	470,58069	

Z	tbo	xbo	Thz	Tst= 333 K
0,1	242,305953	0,09673909	463,295947	
1,22	2956,13263	0,09673909	463,295947	
2,44	5912,26526	0,09673909	463,295947	
3,66	8868,39789	0,09673909	463,295947	
4,88	11824,5305	0,09673909	463,295947	
6,1	14780,6631	0,09673909	463,295947	

Tableaux 4 : calcul du t_{bo} en fonctions de la hauteur du liquide dans le reservoir pour plusieurs valeurs de temperature du stockage .

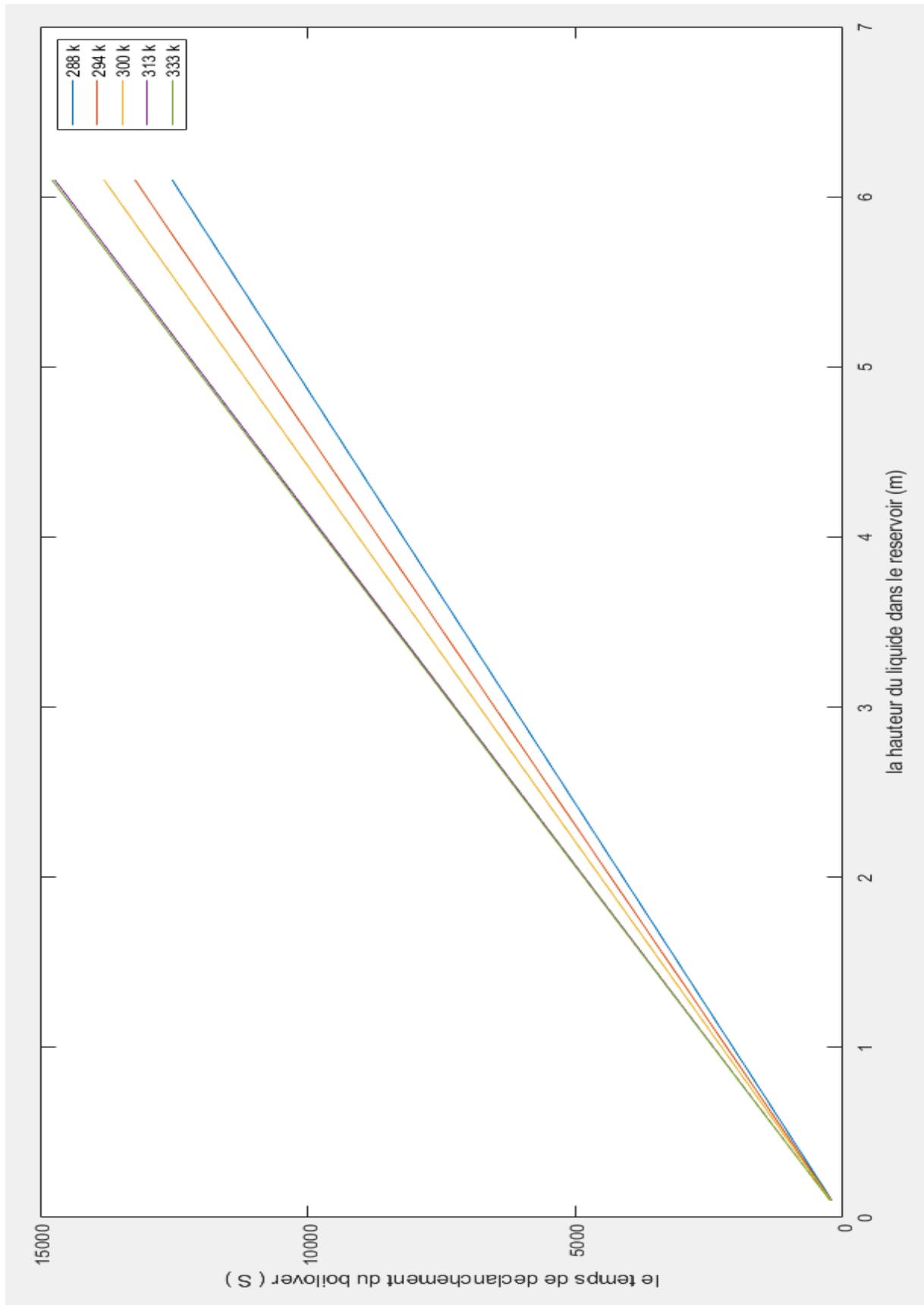


Figure 1 : courbe du temps de déclenchement du boilover en fonction de la hauteur de liquide pour plusieurs températures de stockages

- **Interpretation des tableaux et la courbe :**

L'augmentation de la température de stockage entraîne une diminution de la masse volumique du liquide ainsi que l'augmentation de la chaleur spécifique C_p , l'après les tableaux et les courbes on constate qu'une augmentation de **8,68 %** de la température de stockage entraîne une augmentation de **17,91 %** du temps de déclenchement du boilover

V-2-3-L'estimation des conséquences de boilover :

V-2-3-1-la durée de la boule de feu :

Après le début de la combustion à pleine surface du combustible, la plupart des composants légers sont vaporisés et consommés dans la flamme avant le boilover. Le combustible liquide restant sera composé des composants lourds à une température élevée. La masse du combustible restant, m_{liq} (kg), peut être estimée par la corrélation suivante :

$$m_{liq} = \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) (Z_f - v_a t_{bo}) \rho$$

La masse de combustible consommée dans la flamme en forme de boule de feu, m_{vap} (kg) peut alors être déterminée par la relation suivante :

$$m_{vap} = X_v m_{liq}$$

$$t_{fb} = 1.04 m_{vap}^{0.253}$$

$$m_{liq} = (\pi / 4) \times (55^2) \times (6.1 - (3.992435640457665 \times 10^{-5})) \times 14790,06168 \times 890 =$$

$$\mathbf{11649807.2470451 \text{ kg}}$$

$$m_{vap} = 0,096800606 \times 11649807.2470451 = \mathbf{1127708.40129715 \text{ kg}}$$

$$t_{fb} = 1.04 \times 1127708.40129715^{0.253} = \mathbf{35.3377695085172 \text{ S}}$$

V-2-3-2-le diamètre de la boule de feu

$$D_{fb} = 5.95 m_{vap}^{0.253}$$

$$D_{fb} = 5.95 \times 1127708.40129715^{0.253} = \mathbf{574.959853698457 \text{ m}}$$

V-2-3-3-Le centre de la boule de feu à partir du sol (m) :

$$Z_{fb} = 0.75 D_{fb}$$

$$Z_{fb} = 0.75 \times 574.959853698457 = 431.219890273842 \text{ m}$$

Z (m)	m_{vap} (kg)	t_{fb} (S)	D_{fb} (m)	Z_{fb} (m)
0,1	18476,5333	12,4878687	149,268609	111,951457
1,22	225413,707	23,5145873	339,074017	254,305512
2,44	450827,413	28,0219239	425,630116	319,222587
3,66	676241,12	31,0491016	486,17238	364,629285
4,88	901654,827	33,3932384	534,281563	400,711172
6,1	1127068,53	35,3326956	574,852828	431,139621

Tableau 5 : la durée de la boule de feu et sa géométrie en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.

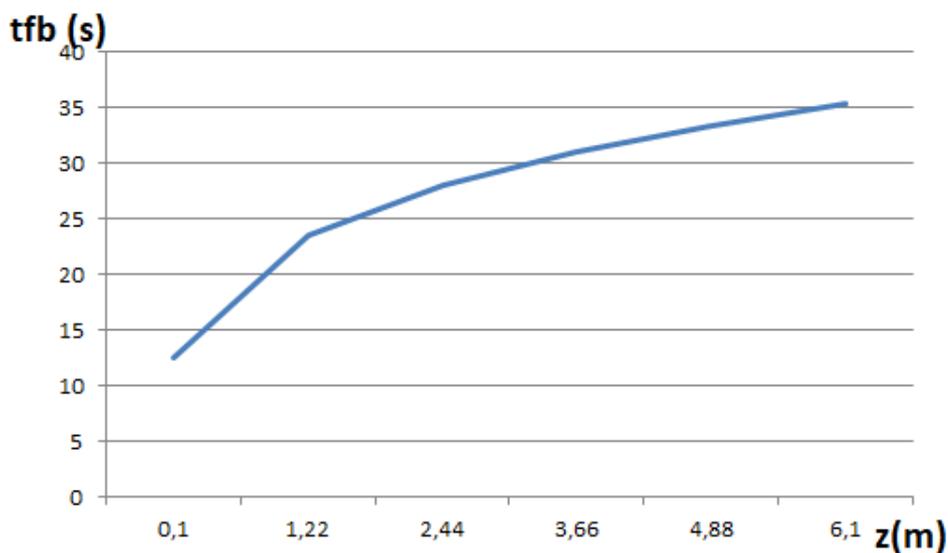


Figure 2 : courbe de variation de la durée de vie d'une boule de feu en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.

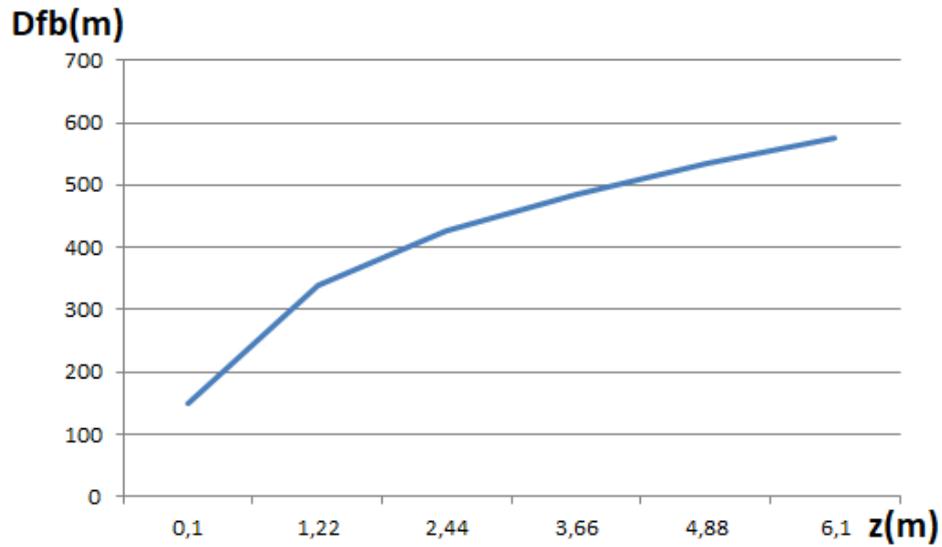


Figure 3 : courbe de la variation de la durée de vie de la boule de feu en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir.

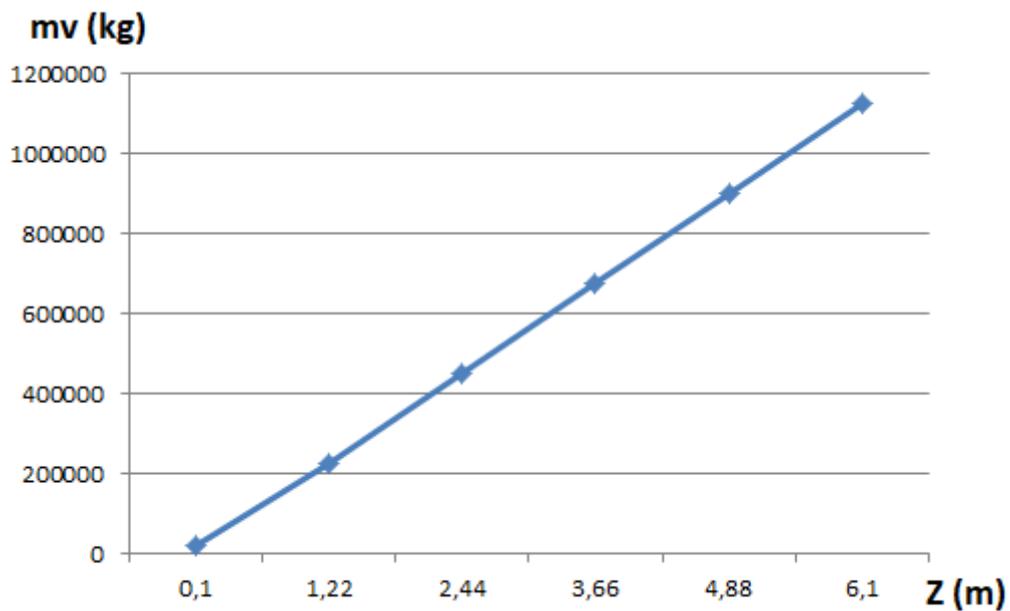


Figure 4 : courbe variation de la masse vaporisée en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir

V-2-3-4-Les effets thermiques de la boule de feu :

V-2-3-4-1-Flux émis en surface ou puissance émissive en surface :

$$E = \frac{f_R m_{vap} \Delta h_c}{\pi D_{fb}^2 t_{fb}}$$

$$E = (0.4 \times 1127708.40129715 \times 42839578.8) / (\pi \times 574.959853698457^2 \times 35.3377695085172) = 526547.979137683 \text{ W /m}^2$$

V-2-3-4-2- facteur de vue :

$$F = \frac{D_{fb}^2}{4L^2} \cos\theta$$

$$L = (X^2 + Z_{fb}^2)^{0.5}, \text{ on suppose que } X=40 \text{ m}$$

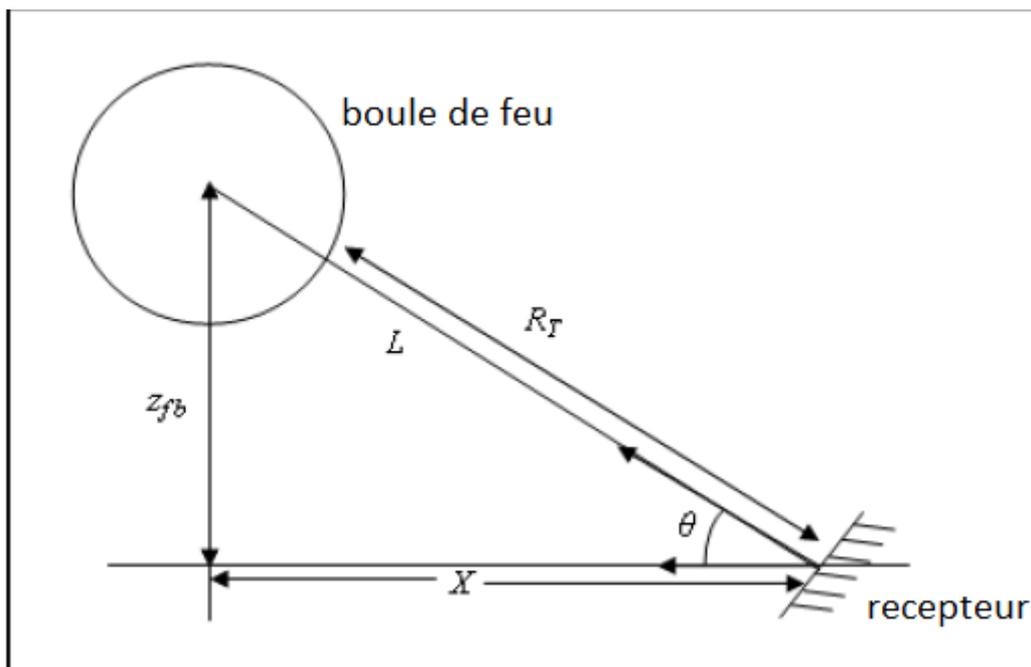


Figure 5 : placement schématique des notations relatives à la boule de feu.

$$L = (40^2 + 431.219890273842^2)^{0.5} = 433.071118602689 \text{ m}$$

$$\cos\theta = X/L = 0.092363582519796$$

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilver classique :

$$F = (574.959853698457^2 / 4 \times 433.071118602689^2) \times 0.092363582519796 = \mathbf{0.0407002781774801}$$

V-2-3-4-3-Distance entre la cible et le niveau de la boule de feu (m) :

$$R_T = L - 0.5 D_{fb}$$

$$R_T = 433.071118602689 - 0.5 \times 574.959853698457 = \mathbf{145.591191753461 \text{ m}}$$

V-2-3-4-4- La pression partielle de l'eau, :

$$p_w = 1013.25 RH e^{14.4114 - \frac{5328}{T_{atm}}}$$

$$p_w = 1013.25 \times 0.75 \times e^{14.4114 - \frac{5328}{T_{atm}}} = \mathbf{23.6992063961081 \text{ pa}}$$

V-2-3-4-5- coefficient de transmission :

$$\tau = \frac{2.02}{(p_w R_T)^{0.09}}$$

$$\tau = 2.02 / (23.6992063961081 \times 145.591191753461)^{0.09} = \mathbf{0.970382974260875}$$

V-2-3-4-6- le flux de puissance reçu :

$$E_R = E F \delta \tau = 526547.979137683 \times 0.0407002781774801 \times 0.9 \times 0.970382974260875 = \mathbf{18716.3434214998 \text{ W/m}^2}$$

X	L	F	RT	taux	ER
0	431,139666	0	143,713222	0,97151749	0
20	431,603303	0,02055082	144,176859	0,9712359	9458,76303
40	432,991237	0,04070766	145,564793	0,97039881	18720,0424
60	435,294626	0,06009727	147,868182	0,96902861	27597,6332
80	438,499044	0,07838581	151,0726	0,96716064	35926,6358
100	442,58492	0,09529357	155,158476	0,96484051	43571,2077
120	447,528113	0,11060474	160,101669	0,96212101	50429,4096
140	453,300575	0,12417171	165,874131	0,95905883	56434,9801
160	459,871081	0,13591429	172,444637	0,95571159	61556,2904

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilver classique :

180	467,205963	0,14581454	179,779519	0,95213539	65793,0449
200	475,26983	0,15390853	187,843386	0,94838286	69171,4461
220	484,026251	0,16027633	196,599807	0,94450193	71738,5651
240	493,438356	0,16503117	206,011912	0,94053512	73556,566
260	503,469375	0,16830911	216,042931	0,93651928	74697,2817
280	514,083078	0,17025958	226,656634	0,93248567	75237,4688
300	525,244145	0,17103738	237,817701	0,92846033	75254,9117
320	536,91844	0,1707963	249,491996	0,92446448	74825,4183
340	549,07323	0,16968426	261,646786	0,92051515	74020,6597
360	561,67732	0,16783993	274,250876	0,91662565	72906,7512
380	574,70115	0,16539061	287,274706	0,91280616	71543,4476
400	588,116835	0,16245108	300,690391	0,90906423	69983,8174
420	601,898174	0,15912326	314,47173	0,9054052	68274,2753
440	616,020626	0,15549641	328,594182	0,90183262	66454,8616
460	630,461269	0,15164777	343,034825	0,89834859	64559,6828
480	645,198738	0,14764344	357,772294	0,89495402	62617,4441
500	660,213156	0,14353933	372,786712	0,89164892	60652,0206
520	675,486056	0,1393823	388,059612	0,88843256	58683,0327
540	691,000298	0,13521115	403,573854	0,88530365	56726,3989
560	706,739989	0,13105768	419,313545	0,88226048	54794,8525
580	722,690398	0,12694763	435,263954	0,87930103	52898,4111
600	738,837879	0,12290151	451,411435	0,87642306	51044,7983
620	755,16979	0,11893545	467,743346	0,87362417	49239,8148
640	771,674421	0,11506178	484,247977	0,87090187	47487,6619
660	788,340923	0,11128975	500,914479	0,86825362	45791,2215
680	805,159246	0,10762595	517,732802	0,86567687	44152,2946
700	822,120071	0,10407483	534,693627	0,86316908	42571,8052
720	839,214759	0,10063907	551,788315	0,86072774	41049,9718
740	856,435293	0,09731986	569,008849	0,8583504	39586,4512
760	873,774234	0,09411727	586,34779	0,85603466	38180,459
780	891,22467	0,0910304	603,798226	0,8537782	36830,8693
800	908,780178	0,08805761	621,353734	0,85157877	35536,2976
820	926,434785	0,08519669	639,008341	0,84943419	34295,1681
840	944,182933	0,08244499	656,756489	0,84734239	33105,7694
860	962,019444	0,07979953	674,593001	0,84530135	31966,2997
880	979,939494	0,07725709	692,51305	0,84330915	30874,9031
900	997,938581	0,07481428	710,512137	0,84136393	29829,6986
920	1016,01251	0,07246764	728,586062	0,83946395	28828,8036
940	1034,15734	0,07021363	746,7309	0,8376075	27870,3519

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilver classique :

960	1052,36943	0,06804873	764,942983	0,83579296	26952,5077
980	1070,64532	0,06596942	783,218881	0,83401881	26073,4769
1000	1088,98182	0,06397224	801,555379	0,83228355	25231,5145
1020	1107,37591	0,0620538	819,949469	0,83058578	24424,9311
1040	1125,82477	0,0602108	838,398325	0,82892415	23652,0961
1060	1144,32575	0,05844001	856,899301	0,82729737	22911,4412
1080	1162,87635	0,05673833	875,449909	0,82570423	22201,4608
1100	1181,47425	0,05510276	894,047809	0,82414354	21520,7134
1120	1200,11725	0,05353039	912,690805	0,82261419	20867,8203
1140	1218,80327	0,05201846	931,376826	0,8211151	20241,4659
1160	1237,53037	0,05056428	950,103924	0,81964525	19640,3953
1180	1256,29671	0,04916531	968,870261	0,81820367	19063,4135
1200	1275,10055	0,047819099	987,674106	0,81678941	18509,3832
1220	1293,94027	0,04652331	1006,51382	0,81540158	17977,2228
1240	1312,81431	0,04527571	1025,38787	0,81403934	17465,9042
1260	1331,72122	0,04407416	1044,29478	0,81270185	16974,4509
1280	1350,65962	0,04291664	1063,23318	0,81138834	16501,9355
1300	1369,6282	0,0418012	1082,20176	0,81009805	16047,4774
1320	1388,62573	0,040726	1101,19928	0,80883027	15610,241
1340	1407,65103	0,03968928	1120,22458	0,8075843	15189,4331
1360	1426,70299	0,03868937	1139,27654	0,80635949	14784,3013
1380	1445,78055	0,03772467	1158,35411	0,80515521	14394,1312
1400	1464,88273	0,03679365	1177,45629	0,80397084	14018,2454
1420	1484,00856	0,03589489	1196,58212	0,8028058	13656,0007
1440	1503,15715	0,03502699	1215,7307	0,80165954	13306,7868
1460	1522,32763	0,03418865	1234,90119	0,80053151	12970,0246
1480	1541,51919	0,03337862	1254,09275	0,79942119	12645,1641
1500	1560,73105	0,03259571	1273,30461	0,79832811	12331,6835

Tableau 6: le flux de radiation reçue par la cible en fonction de la distance

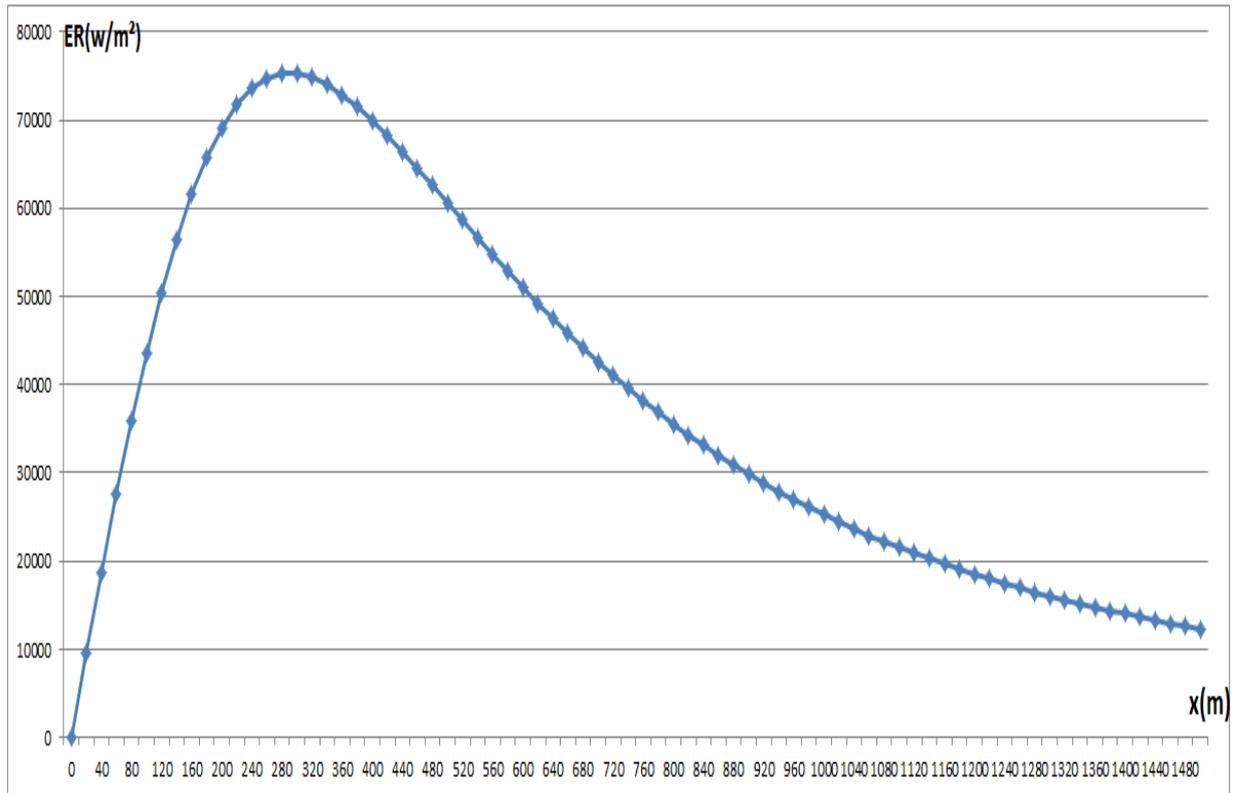


Figure 6 : courbe de la variation des radiations reçue en fonction de la distance du récepteur.

- **Interprétation :**

L'après la courbe On remarque que la radiation reçue par la cible augmente en fonction de la distance de 0 m jusqu'à 300 m et atteint une valeur maximale de radiation maximale égale à 75,254 KW/m², a partir ce point le taux de radiation commence à diminuer en fonction de la distance.

V-2-3-5-Les pression et la température au moment du boilover :

Lorsque le boilover commence, une colonne de combustible très riche est soulevée rapidement dans l'atmosphère jusqu'à une altitude où il y a suffisamment d'air pour permettre une combustion violente. Le soulèvement est dû à l'action d'un effet de piston (dû à l'expansion de l'eau en vapeur) expulsant le contenu du combustible hors du réservoir. car la pression due à l'expansion de la vapeur est supérieure à la pression générée par la colonne de liquide , P^* (pa)

$$P^* = [P_{atm} + (\rho Z g)] \quad (\text{pa})$$

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

P_{atm} : pression atmosphérique (pa)

ρ : la masse volumique du fluide (kg/m³)

g : l'accélération de la pesanteur (m/s²)

Z : la hauteur du liquide dans le réservoir avant l'occurrence du boilover (m)

Pendant l'expulsion, une fraction du combustible liquide est vaporisée et se dilate, alimentant ainsi le feu de nappe pour produire une flamme de type boule de feu. La vaporisation se produit en raison de l'augmentation de la température pendant le boilover. La température pendant le processus de vaporisation est estimée par la formule suivante :

$$T_{vap,bo} = T_{hz} + T^*$$

L'augmentation de température, T^* (K), à laquelle une fraction du combustible liquide restant se vaporise au moment du boilover est déterminée par l'équation de la courbe de pression de vapeur et la pression de vaporisation, P , comme suit :

$$T^* = \exp \left[\frac{\ln P^* - \beta}{\alpha} \right] - T_{bp,tbo}$$

$T_{bp,tbo}$: est le point d'ébullition (K) du liquide au moment du boilover

α , β : sont les constantes de la ligne droite (supposée) de l'équation de la courbe de pression de vapeur entre deux points de conditions initiales : P_{atm} et $T_{bp,bo}$, T_{cr} et P_{cr} .

Comme la composition du combustible change en raison de la vaporisation des parties les plus légères, la température moyenne d'ébullition du combustible restant change également. Le point d'ébullition du combustible liquide au moment du boilover $T_{bp,tbo}$, est considéré comme une moyenne entre la température de la zone chaude immédiatement avant l'ébullition T_{hz} et le point d'ébullition maximal du combustible. Les constantes α et β sont déterminées par les corrélations suivantes :

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{P_{cr}}{P_{atm}}\right)}{\ln\left(\frac{T_{cr}}{T_{bp,tbo}}\right)}$$

$$\beta = \ln P_{atm} - \alpha \ln T_{bp,tbo}$$

$$P^* = [P_{atm} + (\rho Z g)] = 100000 + (890 * 6.1 * 9.81) = \mathbf{153258.49 \text{ pa}}$$

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{P_{cr}}{P_{atm}}\right)}{\ln\left(\frac{T_{cr}}{T_{bp,tbo}}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{1530000}{100000}\right)}{\ln\left(\frac{929.8}{542.447973428259}\right)} = \mathbf{5.06210351922568}$$

$$\beta = \ln P_{atm} - \alpha \ln T_{bp,tbo} = \ln(100000) - 5.06210351922568 \times \ln(542.447973428259) = \mathbf{-20.3585449132389}$$

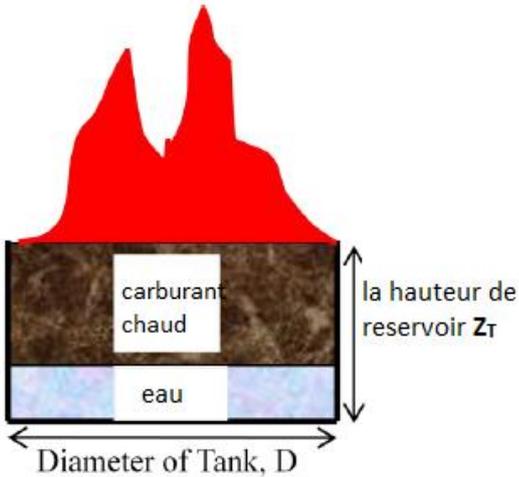
$$T^* = \exp\left[\frac{\ln P^* - \beta}{\alpha}\right] - T_{bp,tbo} = \exp\left[\frac{\ln(153258.49) - (-20.3585449132389)}{5.06210351922568}\right] - 542.447973428259 = \mathbf{47.7368396911231 \text{ K}}$$

$$T_{vap,bo} = T_{hz} + T^* = 463,3320093 + 47.7368396911231 = \mathbf{511.03278654764 \text{ K}}$$

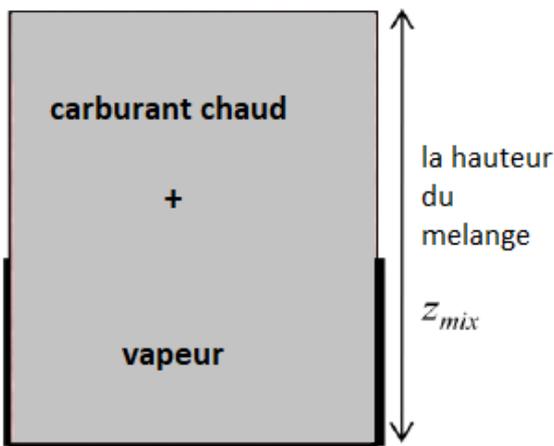
V-2-3-6-Zone affectée par la propagation de combustibles brûlants :

Lors du boilover, en raison de la production de vapeur lorsque la zone chaude atteint l'interface combustible-eau au fond du réservoir, une colonne de mélange combustible-vapeur est soulevée dans l'atmosphère. La hauteur de cette colonne riche en carburant Z_{mix} , devrait être plus grande que la hauteur du réservoir de stockage Z_T , La différence entre ces deux hauteurs donne l'estimation du volume de combustible chaud qui se disperse à l'extérieur du réservoir. et donc la surface affectée par le combustible éjecté pendant le boilover.

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilover classique :

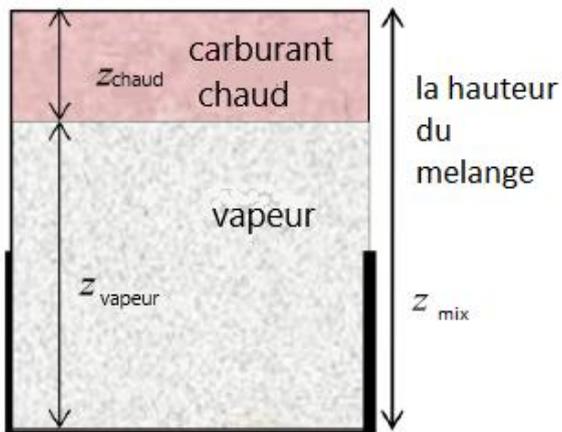


Au fur et à mesure que la combustion progresse, la base de la zone chaude (combustible chaud) se déplace vers le bas à une vitesse pseudo constante vers l'interface combustible-eau. La zone chaude réchauffe l'interface combustible-eau et, par conséquent, un boilover se produit .



Pendant le boilover, en raison de la production de vapeur, une colonne de de mélange carburant-vapeur est soulevée dans l'atmosphère. La hauteur du mélange est donnée par :

$$Z_{mix} = \frac{m_{vapeur} + m_{fin}}{\frac{\pi D^2}{4} \rho_{mix}}$$



où m_{vapeur} est la masse de vapeur, m_{fin} est le reste du carburant liquide pendant le boilover après avoir soustrait la fraction qui a été consommée dans la boule de feu et ρ_{mix} est la densité du mélange combustible-vapeur, La densité du mélange carburant-vapeur est cependant difficile à évaluer Par conséquent, la hauteur du mélange carburant-vapeur est déterminée en suivant la base montrée dans la figure.

Figure 7: Base simple pour déterminer la hauteur du mélange liquide-vapeur

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilver classique :

$$Z_{\text{mix}} = Z_{\text{vapeur}} + Z_{\text{chaud}}$$

Ou :

Z_{vapeur} : est la hauteur de la colonne de vapeur produite (m)

Z_{chaud} : est la hauteur de la colonne du carburant liquide chaud (m)

La hauteur de la colonne de carburant liquide chaud est calculée sur la base de l'équilibre du combustible liquide. m_{fin} qui serait éjecté durant le boilver, la densité du carburant à la température de stockage ρ_L et la section du réservoir A .

$$Z_{\text{chaud}} = \frac{m_{\text{fin}}}{\rho_L A} = \frac{m_{\text{liq}} - m_{\text{vap}}}{\rho_L A} = \frac{11649807.2470451 - 1127708.40129715}{890 \times 2375.829444277281} = 4.97619178903092 \text{ m}$$

$$V_{\text{vapeur}} = \frac{\rho_{\text{eau}}}{\rho_{\text{vapeur}}} V_{\text{eau}}$$

- Le volume d'eau dans le fond de reservoir :

$$V_{\text{eau}} = Z_{\text{eau}} \times A = 0.5 \times 2375.829444277281 = 1187.914722138641 \text{ m}^3$$

- La densité de la vapeur d'eau :

$$\rho_{\text{vapeur}}(\text{à } T_{\text{vap,bo}}) = \rho_{\text{vapeur}}(\text{à } T_{\text{atm}}) \left(\frac{T_{\text{atm}}}{T_{\text{vap,bo}}} \right) = 0.023073373327180 * \left(\frac{298}{511.032786547643} \right) = 0.023073373327180 \text{ kg /m}^3$$

- le volume de la vapeur d'eau :

$$V_{\text{vapeur}} = \frac{\rho_{\text{eau}}}{\rho_{\text{vapeur}}} V_{\text{eau}} = \frac{998.1}{0.023073373327180} \times 1187.914722138641 = 88121265.9161854 \text{ m}^3$$

- La masse de la vapeur d'eau :

$$m_{\text{vapeur,eau}} = \rho_{\text{vapeur}} \times V_{\text{vapeur}} = 0.023073373327180 \times 88121265.9161854 = 1185657.68416658 \text{ kg}$$

- la hauteur de la vapeur d'eau :

$$Z_{\text{vapeur}} = V_{\text{vapeur}} / A = 88121265.9161854 / 2375.829444277281 =$$

$$37090.7373542 \text{ m}$$

- La hauteur du mélange fuel+ vapeur d'eau :

$$Z_{\text{mix}} = Z_{\text{vapeur}} + Z_{\text{chaud}} = 37090.7373542 + 4.97619178903092 = 37095.7135460403 \text{ m}$$

V-2-3-6-1-La quantité de combustible éjectée pendant le boilover :

$$V_E = A \times (Z_{\text{mix}} - Z_T)$$

Ou

A : la section du réservoir (m²)

Z_T : la hauteur du réservoir (m)

V_E : le volume du mélange fuel oil chaud+ vapeur d'eau éjecté du réservoir de stockage. (m³)

$$V_E = A \times (Z_{\text{mix}} - Z_T) = 2375.829444277281 \times (37095.7135460403 - 17) =$$

$$88092699.3986054 \text{ m}^3$$

V-2-3-6-2-La zone affecté par l'éjection :

$$A_E = 103.4 \times (V_E)^{0.825} = 103.4 \times 88092699.3986054^{0.825} = 370762644.572797 \text{ m}^2$$

V-2-3-6-3-Le diamètre de la zone affecté :

$$D_{AE} = \sqrt{\frac{4A_E}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 370762644.572797}{\pi}} = 21727.1641219160 \text{ m}$$

Chapitre 5 : Modélisation du phénomène boilver classique :

$Z_{\text{eau}} \text{ (m)}$	$Z_f \text{ (m)}$	$Z_{\text{vapeur}} \text{ (m)}$	$Z_{\text{chaud}} \text{ (m)}$	$Z_{\text{mix}} \text{ (m)}$	$VE \text{ (m}^3\text{)}$	$AE \text{ (m}^2\text{)}$	$D_{AE} \text{ (m)}$
0,008	0,1	593,452	0,081588	593,533	1369745	11946710	3900,1312
0,1	1,22	7418,15	0,995373	7419,14	17586229	98126890	11177,613
0,2	2,44	14836,3	1,990746	14838,3	35212847	173999892	14884,339
0,3	3,66	22254,4	2,98612	22257,4	52839465	243198688	17596,88
0,4	4,88	29672,6	3,981493	29676,6	70466083	308392741	19815,596
0,5	6,1	37090,7	4,976866	37095,7	88092701	370762650	21727,164

Tableaux 7 : la zone affectée par le combustible projeté et la zone affecté en fonction de la hauteur de l'eau et du combustible dans le réservoir.

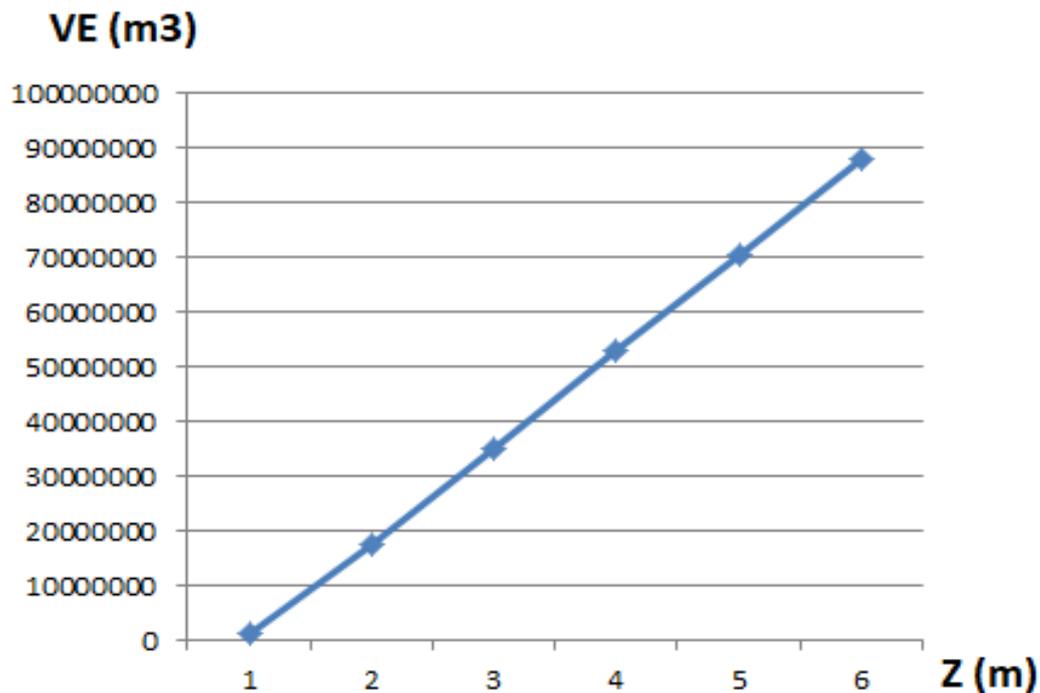


Figure 8 : courbe d'évolution du volume projeté pendant le boilver

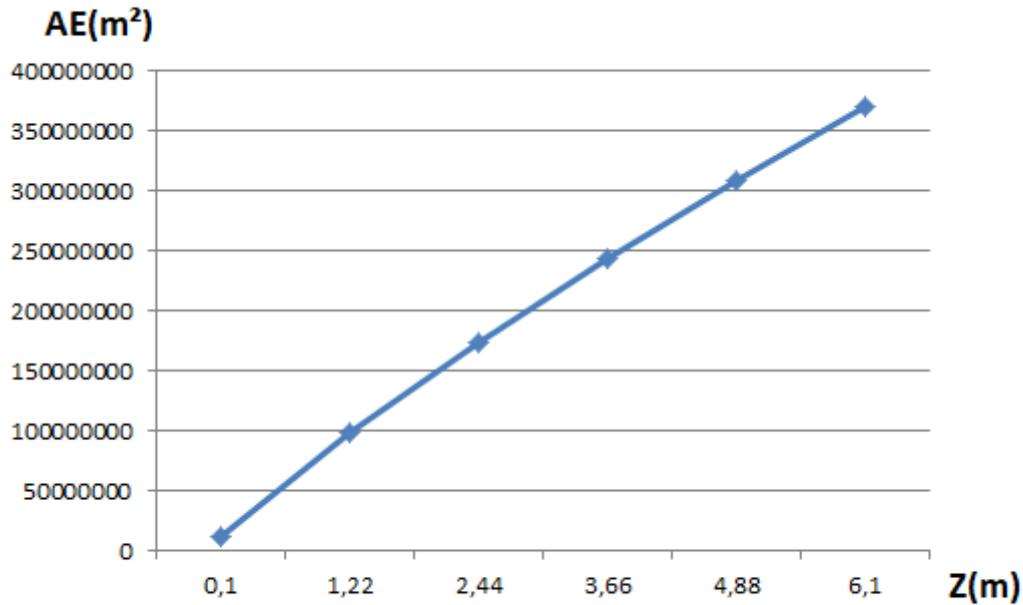


Figure 9 :courbe représentative de la zone affectée par le liquide projeté en fonction de la hauteur du liquide dans le réservoir

- **Interprétation du tableau et des courbes:**

On constate que plus les hauteurs du combustible et de l'eau dans fond de réservoirs sont grands plus que la quantité du projeté et la zone affecté sont grandes ce qui implique plus de dommage.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le boilover est un phénomène industriel dangereux et rare. S'il se réalise, il peut causer des dégâts très importants et pour éliminer ces risques on doit éviter la présence d'une onde de chaleur (source de chaleur). Par ailleurs, et plus fondamentalement, le liquide doit être suffisamment visqueux pour que l'effet de piston se produise. Le cas échéant, la Vapeur créée au contact de la zone chaude et de l'eau au fond du réservoir ne peut pas traverser facilement depuis le bas du réservoir. Ce qui explique que l'effet piston soit plus faible car la vapeur d'eau va fragmenter la couche de l'hydrocarbure liquide. Ceci conduit à la formation de la boule du feu. Donc, si la viscosité est trop faible, il n'y aura pas d'effet piston rendant la réalisation du boilover impossible.

Malgré le danger de ce phénomène il reste toujours prévisible, pour l'étude réalisé il a été déduit le temps de déclenchement du boilover est d'environ 4 heures ce qui est suffisant pour l'établissement des mesures de prévention pour réduire les dégâts.

BIBLIOGRAPGIE :

[1] Blinov, V. I., Khudiakov, G. N. Doklasy Akademi Nauk SSSR 113 (1957) 1094.

[2] Hotel, H. C. Fire Resarch Abstracts and Reviews 1 (1959) 41.

[3] Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics. John Wiley and Sons, New York, 1997.

- ❖ INERIS Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006) Ω-5.
- ❖ INERIS Boil-over classique et boil-over couche mince 13 . Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs Ω-13.
- ❖ Guide Dépôts de Liquides Inflammables Version - Octobre 2008.
- ❖ Les boil over et autres phénomènes générant des boules de feu concernant les bacs des dépôts de liquides inflammables version Juin 2007.
- ❖ GUIDE METHODOLOGIQUE UFIP POUR LA RÉALISATION DES ÉTUDES DE DANGERS EN RAFFINERIES, STOCKAGES ET DÉPOTS DE PRODUITS LIQUIDES ET LIQUEFIÉS .
- ❖ Modeling of boilover phenomenon consequences : Computational fluid dynamics (CFD) and empirical correlations , Process Safety and Environmental Protection 129 (2019) 25–39 .
- ❖ Evaluation of effects and consequences of major accidents in industrial plants , Joaquim Casal , industrial safety serises Volume 8
- ❖ Boilover in liquid hydrocarbon tank fires , Buang Azizul. 2014.

- ❖ Cours du Département Génie des Transports U.M.Constantine Master 1 TDH S2 (2019-2020).

- ❖ M. KARDACHE et A.LOUNIS , stockage des hydrocarbure 1 er partie , departement mecanique petrolière et transport des HC , ecole d'arzew , IAP 2015 .

- ❖ Des anciennes mémoires de la bibliothèque de la faculté des hydrocarbures et chimie.

- ❖ IRSN - Rapport scientifique et technique 2005